



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

**VYUŽITÍ R - MATERIÁLU V ASFALTOVÝCH
KOBERCÍCH MASTIXOVÝCH**

USAGE OF RECYCLED MATERIAL IN STONE MASTIC ASPHALTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Slavíček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Michal Slaviček
Název	Využití R - materiálu v asfaltových kobercích mastixových
Vedoucí práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační normy pro asfaltové směsi řady 13 108.

Zkušební normy pro asfaltové směsi za horka řady 12697.

Kniha Technologie stavby vozovek - Jan Zajíček a kol.

Internetové zdroje.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem práce bude zpracovat problematiku využití R - materiálu v asfaltových směsích typu SMA (Stone Mastic Asphalt). Bude provedeno stanovení vybraných empirických a funkčních vlastností na laboratorně vyrobených asfaltových směsích typu SMA s přídavkem R - materiálu.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá ověřením návrhu asfaltové směsi typu SMA 11S s R – materiálem získaným z obrusné vrstvy asfaltové směsi typu SMA v množství 30 % a 50 % z celkového objemu směsi. Práce je členěna na dvě části. První část je teoretická a zabývá se problematikou recyklování asfaltových směsí a přidáváním R-materiálu do nich. V rámci druhé, praktické části byly zjištěny vlastnosti vstupních materiálu a navrženy směsi SMA 11S s 30 % a s 50 % R – materiálu. Na navržených směsích byly ověřeny vlastnosti pomocí funkčních zkoušek a porovnány s referenční směsí bez R-materiálu a se směsí s 30 % běžného R-materiálu. V závěru jsou všechny naměřené výsledky shrnuty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltová směs, modifikované asfaltové pojivo, asfaltový koberec mastixový, funkční zkoušky asfaltových směsí, kamenivo, R – materiál, recyklace vozovek, šaržová obalovna.

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the designs of asphalt mixtures for the wearing asphalt courses, specifically for the SMA 11S with an added 30 % and 50 % RAP (reclaimed asphalt pavement), this material was reclaimed from the wearing asphalt course type SMA. The thesis is divided into two parts. The first part is theoretical and it deals with the recycling of asphalt roads and adding RAP to the new asphalt mixtures for the roads. The second part is practical. It deals with the design itself. Two types of SMA were designed, first with a 30 % RAP and second with a 50 % RAP. In those mixtures functional tests of asphalt mixtures were made. The results were compared to the asphalt mixture with 0 % of RAP and with the mixture with 30 % of RAP reclaimed from the wearing, binder and base course together. The results are summed up in the conclusion.

KEYWORDS

Asphalt mixture, modified asphalt binder, stone mastic asphalt, functional tests of asphalt mixtures, aggregate, RAP (reclaimed asphalt pavement), recycling of roads, batch mixing plants.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Michal Slavíček Využití R - materiálu v asfaltových kobercích mastixových. Brno, 2017. 94 s., 21 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Michal Slaviček
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za vzorné vedení při zpracování této práce. Ing. Ivě Coufalíkové za pomoc při zpracování této práce a za pomoc v laboratoři pozemních komunikací. Dále bych rád poděkoval všem zaměstnancům laboratoře pozemních komunikací, kteří mi pomáhali při zpracování praktické části této práce. Dále bych rád poděkoval Centru AdMaS, které mi poskytlo své laboratorní prostory. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu a při psaní této práce. Dále bych chtěl také poděkovat firmě Froněk, spol. s r.o., která mi poskytla potřebný materiál.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretická část	14
2.1	R – materiál	14
2.1.1	Získávání R – materiálu	14
2.2	Druhy silničních fréz:.....	15
2.3	Typy recyklace	15
2.3.1	Na místě za studena	15
2.3.2	Na místě za horka	16
2.3.3	V míchacím centru za studena	16
2.3.4	Recyklace v míchacím centru za horka	17
2.4	Technologická opatření nezbytná pro umožnění zpracování R – materiálu ve vyšším množství	20
2.5	Asfaltový koberec mastixový SMA (Stone mastic asphalt)	21
3	Cíl práce	22
4	Praktická část	23
4.1	Použité materiály.....	23
4.1.1	Kamenivo.....	23
4.1.2	Vápencová moučka.....	23
4.1.3	R – materiál.....	25
4.1.4	Rejuvenátor	26
4.1.5	Celulózová vlákna.....	26
4.1.6	Asfaltové pojivo.....	27
4.1.7	Addibit	27
4.2	Použité zkušební metody.....	28
4.2.1	Homogenizace a kvartace	28
4.2.2	Znovuzískání extrahovaného pojiva	29

4.2.3	Stanovení čáry zrnitosti	32
4.2.4	Stanovení penetrace jehlou	33
4.2.5	Stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička	34
4.2.6	Laboratorní výroba směsi	36
4.2.7	Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi	38
4.2.8	Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem	41
4.2.9	Příprava zkušební těles zhutňovačem desek	43
4.2.10	Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles	45
4.2.11	Stanovení mezerovitosti.....	46
4.2.12	Odolnost proti tvorbě trvalých deformací.....	47
4.2.13	Měření modulů tuhosti.....	49
4.2.14	Stanovení nízkoteplotních vlastností	52
4.3	Návrh asfaltových směsí	55
4.3.1	Stanovení obsahu pojiva v R - materiálu	55
4.3.2	Sítový rozbor.....	56
4.3.3	Vlastnosti asfaltového pojiva.....	57
4.3.4	Návrh směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA	58
4.3.5	Návrh směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA	63
4.3.6	Příprava zkušebních těles.....	65
4.4	Výsledky funkčních zkoušek	67
4.4.1	Odolnost proti tvorbě trvalých deformací.....	67
4.4.2	Moduly tuhosti asfaltové směsi	73
4.4.3	Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi.....	79
5	Závěr	82
6	Seznam použitých zdrojů.....	83
7	Seznam obrázků.....	87
8	Seznam tabulek	89

9	Seznam grafů	91
10	Seznam rovnic.....	92
11	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	93
12	Seznam příloh	94

1 Úvod

V dnešní době dochází ke stále častějšímu využívání už jednou použitých surovin a to ve všech odvětvích výroby. K tomuto dochází v důsledku stále větší poptávky po kvalitních vstupních surovinách. Jelikož množství kvalitních surovin není neomezené, ať už z fyzického nedostatku v přírodě nebo v nedokonalosti výrobního procesu, jsme nuceni využívat již použité materiály, které končí na skládkách, pro tyto materiály určených.

Procesu znovuvyužití surovin se říká recyklace. Název pochází z anglického recycling (opětovné použití). Výraz natolik zdomácněl, že se slovo „recyklace“ běžně v českém jazyce používá. [1]

Recyklace stavebních materiálů je jedním z nejdůležitějších nástrojů pro zachování udržitelného rozvoje a překlenutí rozporu mezi ekonomickým růstem a ochranou životního prostředí. [2]

V silničním stavitelství se recyklací rozumí technologický proces, kterým se získává materiál dříve zabudovaný ve stavební konstrukci za účelem jeho opětovného využití ve stavební konstrukci nové nebo opravené. Takto získanému materiálu se říká recyklovaný materiál nebo také R – materiál.

Tuto recyklaci lze obecně provádět na místě pomocí frézy nebo v mísícím centru za použití dodaného R – materiálu.

Hlavní přínosy recyklace:

- ♦ Zachování materiálových a energetických zdrojů
- ♦ Ochrana životního prostředí
- ♦ Snížení objemu přepravy materiálu
- ♦ Snížení nákladů.

Hlavní cíle recyklace:

- ♦ Přeměna konstrukce vozovky vykazující známky postupné degradace
- ♦ Zlepšení fyzikálně mechanických a reologických vlastností konstrukce vozovky
- ♦ Prodloužení životnosti vozovky

- ♦ Zvýšení celkové únosnosti vozovky
- ♦ Zlepšení protismykových vlastností krytu vozovky. [3]

Díky celkovému rozvoji v oblasti recyklace je v dnešní době snaha používat stále větší množství R – materiálu do směsí pro konstrukční vrstvy vozovek. Tento proces je částečně brzděn legislativně, jelikož normy v České republice omezují využití R – materiálu do jednotlivých asfaltových směsí. Do směsí asfaltového koberce mastixového (SMA) to neumožňují vůbec. Do směsí typu asfaltový beton (AC) je použití R – materiálu omezeno, dle tabulky níže.

Tab. 1: Nejvyšší přípustný obsah R – materiálu v % asfaltové směsi typu asfaltový beton [36]

Obrusné vrstvy		Ložní vrstvy		Podkladní vrstvy	
Druh směsi	R – materiál	Druh směsi	R – materiál	Druh směsi	R – materiál
ACO 8	25 %	ACL 16S	30 %	ACP 16S	50 %
ACO 8CH	25 %	ACL 16+	30 %	ACP 16+	60 %
ACO 11S	-	ACL 16	40 %	ACP 22S	50 %
ACO 11+	-	ACL 22S	30 %	ACP 22+	60 %
ACO 11	25 %	ACL 22+	30 %		
ACO 16S	-	ACL 22	40 %		
ACO 16+	-				
ACO 16	25 %				

Mezi hlavní překážky využití R – materiálu do asfaltových směsí patří:

- ♦ neoprávněné pochyby investorů o kvalitě R – materiálu
- ♦ neznalost technických norem a předpisů
- ♦ nedostatečná motivace a nezájem investorů
- ♦ nejasná cenová politika
- ♦ nutnost úpravy stávajících předpisů o použití R – materiálu. [2]

Dle výzkumu z roku 2014, který provedla Evropská asociace pro asfaltové vozovky (EAPA), využila Česká republika pouze 16 % z celkového objemu získaného R – materiálu do asfaltových směsí míchaných za horka na obalovnách. Oproti ostatním zemím Česká republika zaostává, dle tabulky níže. [32]

Tab. 2: Využití R - materiálu do asfaltových směsí za horka. [32]

Země	Vyfrézovaný materiál	Využití při recyklaci za horka
Česká republika	1 600 000 t	16 %
Slovenská republika	30 000 t	98 %
Belgie	1 500 000 t	72 %
Německo	10 900 000 t	90 %
USA	68 700 000 t	95%
Francie	9 243 000 t	64 %
Velká Británie	3 350 000 t	52 %
Finsko	1 000 000 t	100 %

2 Teoretická část

2.1 R – materiál

Je stará, rozpojená asfaltová směs, která se získává frézováním, nebo vybouráním a drcením již nevyhovujících asfaltových vrstev. Tato směs se dále třídí a používá jako náhrada části kameniva a pojiva při výrobě nových asfaltových směsí.

Může být použit i jako nestmelená podkladní vrstva jako alternativa k vrstvě mechanicky zpevněného kameniva (MZK) nebo vrstvě štěrkodrti (ŠD). Nejefektivnější využití R – materiálu je při výrobě asfaltových směsí, a proto by mělo být využití do podkladních vrstev omezováno.

Pokud vlastnosti R – materiálů splňují požadavky uplatňované u materiálů přírodních, jsou R – materiály stejně hodnotné a jejich použití není na úkor kvality stavebního díla. [4]

2.1.1 Získávání R – materiálu

R – materiál lze získat vybouráním nebo frézováním. V obou případech je nutné materiál přetřídit a upravit předrcením na požadovanou frakci.

Vybouráním – provádí se bouracími stroji. V prvním kroku je možné vybourat vrstvy stmelené asfaltovým pojivem a v druhém kroku zbývající vrstvy. Oddělené vybourávání umožňuje tento R – materiál po předrcení a přetřídění znovu použít do konstrukčních vrstev.

Frézováním – provádí se silničními frézami. Je to proces rozpojení konstrukčních vrstev ocelovými hroty silniční frézy. Frézování by mělo být prováděno po jednotlivých vrstvách a to z důvodu rozdílné kvality vstupních materiálů použitých v různých konstrukčních vrstvách vozovky. V případě že není zvoleno selektivní frézování, dojde k znehodnocení nejkvalitnějšího materiálu použitého v obrusných vrstvách. Z tohoto důvodu se vyfrézovaný R – materiál používá do méně kvalitních ložních a podkladních vrstev, nikoliv do vrstev obrusných. [4]



Obr 1: Silniční fréza Wirtgen [5]

2.2 Druhy silničních fréz:

Silniční frézy se dělí především dle šířky frézovacího válce na:

- ♦ **Malé** – šířka frézovacího válce do 500 mm, záběrová hloubka < 100 mm,
- ♦ **Střední** – šířka frézovacího válce 500-1000 mm, záběrová hloubka do 180 mm,
- ♦ **Velké** – šířka frézovacího válce nad 1000 mm, záběrová hloubka do 350 mm,
- ♦ **Speciální** – šířka frézovacího válce do 350 mm, záběrová hloubka je až 100 mm.

Využívají se pro sanační práce na odfrézování poškozených krytových vrstev v blízkosti kanalizačních poklopů, uličních vpustí, rigolů apod. [3]

2.3 Typy recyklace

Rozeznáváme tyto typy recyklace:

- ♦ Na místě za studena
- ♦ Na místě za horka
- ♦ V míchacím centru za studena
- ♦ Na obalovně za horka

2.3.1 Na místě za studena

Jedná se o technologický proces, při kterém se zhotoví recyklovaná vrstva rozpojením a úpravou staré vrstvy vozovky pomocí recyklačního zařízení přímo na místě. Takto vzniklý materiál se promíchá s pojivem, přísadami, vodou a případně dalším

materiálem (kamenivo). Kamenivo je možné předem rozprostřít na dosud nerozpojenou vrstvu. Jako pojivo může být použito několik materiálů – asfaltová emulze, zpeněný asfalt, cementová suspenze. Takto upravená vrstva se urovná a zhutní. [6]



Obr 2: Schéma procesu recyklace za studena [7]

2.3.2 Na místě za horka

Jedná se o technologický proces, při kterém dochází k ohřátí vrstvy, jejímu rozpojení a následné úpravě konstrukční vrstvy pomocí recyklačního zařízení. Rozeznáváme tyto typy recyklace na místě za horka:

- ♦ Reshape
- ♦ Repave
- ♦ Remix
- ♦ Remix Plus
- ♦ Recyklace v mobilním nízkokapacitním zařízení

Mezi hlavní výhody recyklace na místě za horka patří:

- ♦ Prodloužení životnosti konstrukce vozovky
- ♦ Nízká ekonomická a časová náročnost opravy
- ♦ Zvýšení bezpečnosti účastníků silničního provozu [8]

2.3.3 V míchacím centru za studena

Je založena na předpokladu, že recyklované kamenivo je převezeno do míchacího centra, kde se dávkuje pojivo, přísady, voda, případně další materiál (kamenivo). Takto

vyhotovená směs se převeze na stavbu, rozprostře a zhutní. Během dopravy však nesmí dojít k segregaci nebo znečištění směsi. [6]



Obr 3: Míchací centrum, recyklace za studena [9]

2.3.4 Recyklace v míchacím centru za horka

Tato metoda představuje nejefektivnější využití R – materiálu ze všech předchozích variant. Existují tři metody, jak dávkovat R – materiál do asfaltové směsi na obalovně.

- ♦ Dávkování R – materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny studenou cestou
- ♦ Předehřívání R – materiálu v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny
- ♦ Přidávání R – materiálu do sušícího bubnu kontinuální obalovny (Drum – mix)

2.3.4.1 Dávkování R – materiálu přímo do míchačky šaržové obalovny studenou cestou:

Jedná se o způsob přidávání studeného R – materiálu přímo do míchačky obalovny. Z tohoto důvodu musí být kamenivo předehřáto na vyšší teplotu, aby nedošlo ke snížení teploty míchání. Dalším problémem studeného přidávání R – materiálu je skutečnost, že není vysušen a při přidání k horkému kamenivu dochází ke vzniku velkého množství vodní páry, která musí být odvedena pomocí odsávacího zařízení. V České republice je nyní přibližně 40% šaržových obaloven vybaveno technologií na přidávání studeného R – materiálu. V důsledku dodržení potřebných teplot míchání tato technologie umožňuje přidání pouze maximálního množství 25 % z celkové hmotnosti asfaltové směsi. [10]



Obr 4: Šaržová obalovna AMMANN [11]

2.3.4.2 Předehřívání R – materiálu v paralelním sušícím bubnu šaržové obalovny

Jedná se o způsob přidávání předehřátého R – materiálu v paralelním sušícím bubnu obalovny. Následně se R – materiál dávkuje do míchačky obalovny. Tato metoda umožňuje přidávání až 80 % R – materiálu z celkové hmotnosti asfaltové směsi. V České republice touto technologií disponují pouze čtyři obalovny. [2]

R – materiál se nejdříve nadávkuje do paralelního sušícího bubnu obalovny, kde je zahříván na teplotu cca 130 °C. Dále se k R – materiálu dávkuje změkčovací přísady „rejuvenátory“, které slouží k obnovení vlastností zestárlého pojiva v R – materiálu. Po ohřátí se R-materiál skladuje v silu, ze kterého je následně dávkován do míchačky šaržové obalovny, kde je mísen s kamenivem, filerem, novým asfaltovým pojivem, případně s dalšími přísadami a vzniká tak nová asfaltová směs.

Paralelní buben se nachází v horní části obalovny. Sušící buben se nachází ve spodní části obalovny a pomocí pásových dopravníků je do něj dávkováno kamenivo, které je předehříváno na předepsanou teplotu míchání. Předehřáté kamenivo je dopraveno korečkovým výtahem do horní části míchačky, kde probíhá horké třídění kameniva. Toto kamenivo je uleženo v silu a poté je dávkováno s ostatními přísadami do míchačky obalovny.



Obr 5: Šaržová obalovna AMMANN s paralelním bubnem [11]

2.3.4.3 Přidávání R – materiálu do sušícího bubnu kontinuální obalovny (metoda Drum – mix)

Jedná se o způsob přidávání R – materiálu do bubnu kontinuální obalovny, kde se R – materiál předehtívá společně s kamenivem nebo samostatně ve střední části sušícího bubnu.

V USA je 80% asfaltových směsí vyráběno právě v kontinuálních obalovnách. V České republice je pouze jedna kontinuální obalovna. Nevýhodou kontinuálních obaloven je skutečnost, že nelze měnit složení směsi v průběhu výroby na rozdíl od šaržových obaloven, kde lze změnit recepturu a namíchat směs (šarži) s odlišnými vlastnostmi. Kontinuální obalovny jsou výhodné zejména pro velké stavby. [2]



Obr 6: Kontinuální obalovna ASTEC [12]

2.4 Technologická opatření nezbytná pro umožnění zpracování R – materiálu ve vyšším množství

- ♦ **Zastřešení skládek R – materiálu** – tímto zabráníme pronikání srážkové vody do materiálu a jsme schopni docílit úspory paliv při předehtřívání.
- ♦ **Frézování po vrstvách a oddělené skladování** – odděleným frézováním a skladováním jsme schopni od sebe oddělit kvalitativně odlišné materiály použité v konstrukci vozovky, neznehodnotíme kvalitní materiál obrusné vrstvy.
- ♦ **Homogenizace R – materiálu** – je nezbytný proces pro udržení průběžné kvality R – materiálu a to zejména v případě, kdy není R – materiál odlišné kvality skladován odděleně. [4]



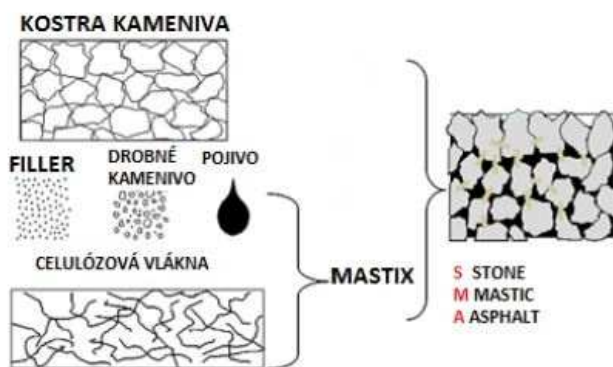
Obr 7: Skládka R - materiálu v Německu [10]

2.5 Asfaltový koberec mastixový SMA (Stone mastic asphalt)

Je to směs, kde kostru tvoří nejhrubší a částečně také druhá nejhrubší frakce kameniva, tudíž je křivka zrnitosti přerušovaná. Zbývající kamenivo společně s asfaltovým pojivem a kamennou moučkou vytváří asfaltovou maltu – mastix, která pojí zrna nosné kostry. Toto je hlavní rozdíl oproti směsi typu asfaltový beton (AC), kde se na kostře podílí všechna zrna vzájemným dotykem. Mezerovitost SMA má být v rozmezí 3 % – 4,5 %. U směsi typu AC má být mezerovitost 2,5 % – 4,0 %.

Směs SMA je určena pro obrusné vrstvy vysoce zatížených vozovek.

Tato směs vznikla v 70. letech v Německu, kde se používaly pneumatiky s hřeby. Protože kostra celé směsi je postavena na vzájemném dotyku velkých zrn, je zapotřebí, aby bylo použito vysoce kvalitní kamenivo. V České republice se do této směsi používá pouze modifikované asfaltové pojivo. [13], [14]



Obr 8: Struktura směsi SMA [13]

3 Cíl práce

Cílem práce je ověřit, zda je možné navrhnout asfaltovou směs SMA 11S s využitím R – materiálu získaného odfrézováním obrusné vrstvy typu SMA a to v zastoupení 30 % a 50 % R – materiálu z celkového objemu směsi. Tyto výsledky porovnat s návrhem směsi typu SMA 11S bez R – materiálu, kterou zpracovala Ing. Markéta Malá v rámci své diplomové práce a s návrhem směsi typu SMA 11S s 30 % běžného R – materiálu - vyfrézovaného z konstrukčních vrstev vozovky.

Práce je rozdělena na dvě základní části – teoretickou a praktickou. Teoretická část měla za úkol seznámení s problematikou využívání R – materiálu, základními pojmy, způsoby recyklace konstrukčních vrstev vozovek a s možnostmi využití získaného R – materiálu do asfaltových směsí.

Úkolem praktické části je navrhnout dvě asfaltové směsi typu SMA 11S. Jednu směs s 30 % R – materiálu a druhou směs s 50 % R – materiálu a ověřit jejich vlastnosti pomocí funkčních zkoušek.

4 Praktická část

4.1 Použité materiály

4.1.1 Kamenivo

Pro návrh směsi SMA 11S jsem použil kamenivo z kamenolomu Sýkořice ve Zbečně frakce 0/2, 2/5, 4/8, 8/11 a vápencovou moučku.



Obr 9: Frakce 0/2 mm



Obr 10: Frakce 2/5 mm



Obr 11: Frakce 4/8 mm



Obr 12: Frakce 8/11 mm

4.1.2 Vápencová moučka

Vápencová moučka neboli filer, je kamenivo připravené mletím na frakci menší než 0,063 mm.



Obr 13: Vápenková moučka

Na všech frakcích kameniva byl stanoven síťový rozbor, který ve své práci provedla Ing. Markéta Malá [33], výsledky jsou zobrazeny níže. Hodnoty síťového rozboru jsou použity pro návrh asfaltové směsi.

Tab. 3: Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [g], [33]

Frakce	Propad sítem [g]										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	2,1	188,8	1976,7	257,7	26,0	15,3	4,0	2,3	3,0	4,2	4,6
4/8	0	0	35,9	275,6	303,7	71,8	3,4	0,9	0,6	0,8	0,8
2/5	0	0	0,7	16,3	111,4	141,8	14,0	2,6	1,2	1,7	2,6
0/2	0	0	0	0	5,5	56,1	59,6	44,7	30,5	21,6	10,9
moučka	0	0	0	0	0	0,05	0,15	0,5	2,15	9,65	18,25

Tab. 4: Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [%], [33]

Frakce	Propad sítem [%]										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
8/11	100	92	13	3	2	1	1	1	1	1	1
4/8	100	100	95	56	12	2	1	1	1	1	1
2/5	100	100	100	95	57	10	6	5	4	4	3
0/2	100	100	100	100	98	75	52	34	21	13	8
moučka	100	100	100	100	100	100	100	99	97	88	69

4.1.3 R – materiál

Pro výrobu asfaltové směsi s 30 % a s 50 % R – materiálu byl použit R – materiál z obrusné vrstvy SMA s modifikovaným asfaltovým pojivem. Materiál byl vyfrézován z komunikace I/6 u Rakovníka. R – materiál mi poskytla firma Froněk s.r.o. R – materiál byl odfrézován a podrcen na frakci 0/11.



Obr 14: R - materiál

Výsledky mnou navržených směsí jsem porovnával s výsledky směsi typu SMA 11S s 30 % RAP (běžného R – materiálu), kterou ve své práci navrhoval Bc. Vojtěch Motl. Ten pro svoji práci použil také R-materiál od firmy Froněk spol. s.r.o., který ale nebyl získán frézováním po jednotlivých vrstvách, ale všechny vrstvy byly frézovány současně, tudíž došlo k promísení materiálů o různé kvalitě. R – materiál byl upraven předrcením na frakci 0/11. Výsledky síťového rozboru jsou zobrazeny v tabulce níže.

Tab. 5: Síťový rozbor R – materiálu [34]

frakce	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
RAP [g]	2,9	77,7	132,0	130,2	103,9	183,2	151,7	111,0	88,7	55,9	37,7
RAP [%]	100	93	82	71	63	47	34	25	17	13	10

Obsah asfaltového pojiva v tomto R – materiálu je 5,2 %, jeho vlastnosti jsou zobrazeny v tabulce níže. Tyto hodnoty jsou později porovnávány s RAP SMA.

Tab. 6: Vlastnosti vyextrahovaného asfaltového pojiva [34]

Vyextrahované pojivo ze směsi	penetrace [p.j.]				bod měknutí [°C]		
	1.	2.	3.	Ø	L	P	Ø
RAP	25	24	25	24,7	-	-	64,4

4.1.4 Rejuvenátor

Je materiál, který se používá pro zlepšení vlastností již oxidovaného asfaltového pojiva v R – materiálu. Jedná se o derivát ropy získaný sekundární rafinací. Patří do skupiny fluxačních olejů. Pro účely této práce byl použit rejuvenátor Storflux, od společnosti Storimpex. Dávkování rejuvenátoru bylo určeno dle zkušeností dodavatele R – materiálu firmy Froněk spol s.r.o., která používá 0,4 % rejuvenátoru z celkové hmotnosti použitého R – materiálu při použití R-materiálu s modifikovaným pojivem. [15]

V případě použití běžného R-materiálu ve směsi typu SMA 11S s 30 % R – materiálu v bakalářské práci Vojtěcha Motla byl rejuvenátor dávkován dle míry zestárnutí obsaženého asfaltového pojiva. Výrobce rejuvenátoru uvádí, že pro snížení 1 °C u zkoušky bodu měknutí se dávkuje 1 % z hmotnosti zestárlého asfaltového pojiva v R – materiálu. V tomto případě to odpovídalo 5,3 % rejuvenátoru na hmotnost zestárlého asfaltového pojiva v R-materiálu.

4.1.5 Celulózová vlákna

Celulózová vlákna se používají ve směsích SMA z důvodu vyššího dávkování asfaltového pojiva pro snížení stékavosti pojiva z kameniva v asfaltové směsi.

V rámci práce jsem použil materiál od firmy CIUR a.s. s označením S-CEL 7. Jedná se o celulózová vlákna, která vzniknou zpětným rozmělněním výběrového tříděného papíru v turbíně. Dávkování vlákna výrobce uvádí 3 – 4 kg na 1 tunu směsi. Pro tuto práci jsem zvolil dávkování 3 kg/t, což odpovídá dávkování 0,3 % z celkové navážky asfaltové směsi. [16]



Obr 15: Celulózová vlákna S-CEL 7 [16]

4.1.6 Asfaltové pojivo

Pro výrobu asfaltových směsí SMA s různým obsahem R-materiálu jsem použil modifikované asfaltové pojivo Colflex 45/80 – 55 vyráběné firmou COLAS CZ a.s. Označení 45/80 – 55 značí penetraci v rozmezí 45 – 80 penetračních jednotek (1 penetrační jednotka = 0,1 mm) a minimální bod měknutí 55 °C. Pojivo jsem dávkoval v množství 6,5 %.



Obr 16: Colflex 45/80 - 55

Modifikované asfalty se používají z důvodu stále rostoucího dopravního zatížení a z toho vyplívajících vyšších nároků na kvalitu asfaltových pojiv. Běžná pojiva svými vlastnostmi nedostačují potřebným požadavkům na kvalitu. Modifikované asfalty jsou asfalty, jejichž vlastnosti byly změněny přidáním modifikačních přísad (polymery, latex, drcená guma, atd.). [17]

Modifikací se snažíme dosáhnout:

- ♦ Zlepšení přilnavosti asfaltu ke kamenivu
- ♦ Snížení bodu lámavosti
- ♦ Zvýšení bodu měknutí
- ♦ Zvýšení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací
- ♦ Snížení stárnutí asfaltu [17]

4.1.7 Addibit

Je to materiál, který se používá pro zlepšení přilnavosti asfaltového pojiva ke kamenivu. Jedná se o tekuté smáčedlo a adhezni přísadu, která zlepšuje přilnavost díky

své nízké viskozitě. Dávkování Addibitu L300 jsem 0,2 % z hmotnosti nově přidávaného asfaltového pojiva. Tuto hodnotu použila ve své diplomové práci Ing. Markéta Malá, která ji stanovila na základě zkoušky stékavosti pojiva. [33]

4.2 Použité zkušební metody

4.2.1 Homogenizace a kvartace

Abych získal reprezentativní vzorky R – materiálu tak, aby výsledky zkoušek na nich prováděných byly dostatečně průkazné, musel jsem provést homogenizaci a kvartaci těchto vzorků. Tento postup se provádí podle normy ČSN EN 12697-28 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 28: Příprava vzorků pro stanovení obsahu pojiva, obsahu vody a zrnitosti.

4.2.1.1 Homogenizace

Materiál jsem vysypal ve větším množství na čistou podlahu, kde jsem ho promísil a vytvořil z něj kužel. Materiál z tohoto kužele jsem přemístil takovým způsobem, aby vytvořil druhý kužel. Následně jsem tento postup zopakoval tak, aby vznikl třetí kužel. Pomocí svislého zasunování lopaty jsem tento třetí kužel zploštil a bylo možné z něj odebrat vzorek, který se dále upravoval pomocí kvartace. [18]

4.2.1.2 Kvartace

Slouží ke zmenšení vzorků na požadovanou velikost navážky. Zploštělý kužel jsem rozdělil na čtyři stejné části vytvořením kříže, viz obrázek č. 18. Dvě diagonálně umístěné části jsem smíchal a zbytek se vyřadil. Takto je možné postupovat až do doby, než se získá zkušební vzorek o potřebné hmotnosti navážky.

Pro získání zkušební vzorku jsem použil tzv. dělič vzorků, viz obrázek č. 19. Do nádoby děliče jsem co nejrovnoměrněji rozmístil materiál a vsypal ho do děliče, který ho rozdělil na dvě stejně velké části. Takto jsem postupoval do doby, než jsem získal vzorek o potřebné hmotnosti. [18]



Obr 17: Homogenizace



Obr 18: Kvartace



Obr 19: Dělič vzorků

4.2.2 Znovuzískání extrahovaného pojiva

Pro zjištění požadovaných vlastností kameniva v R – materiálu a asfaltového pojiva obsaženého v R – materiálu bylo nutné toto pojivo znovuzískat. Tento postup je popsán v normě ČSN EN 12697-3: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva: Rotační vakuové destilační zařízení.

Podstatou zkoušky je oddělení asfaltu ze vzorku asfaltové směsi (R – materiálu) pomocí vhodného rozpouštědla. V rámci této práce byl použit tetrachlorethylen. Po odstranění nerozpustných pevných částic se asfalt získává vakuovou destilací pomocí rotačního vakuového destilačního zařízení. [19]

4.2.2.1 Zkušební pomůcky

Přístroj určený pro extrakci rozpustného asfaltu, rotační vakuový destilační přístroj, vazelína, filtrační papír pro usazení jemných částic, laboratorní váhy s přesností

$\pm 0,1$ g, vhodné jímací a destilační baňky, odvětrávaná sušárna, digestoř, která odsává výpary vzniklé manipulací se směsí. [19]



Obr 20: Zařízení pro extrakci asfaltového pojiva

4.2.2.2 Postup zkoušky

Do vhodné nádoby jsem umístil vysušený vzorek asfaltové směsi o známé hmotnosti (m_1). Vzorek jsem zalil tetrachlorethylenem. Směs s rozpouštědlem jsem promíchal a nechal působit na směs R – materiálu přibližně 10 minut, aby se všechna zrna dokonale oddělila od asfaltového pojiva.

Dále bylo potřeba přichystat přístroj určený k extrahování asfaltového pojiva. Z přístroje jsem vyjmul kovovou válcovou nádobu, umístěnou v odstředivce a vložil jsem do ní filtrační papír, pro zachycení jemných částic. Poté jsem celou nádobu včetně filtračního papíru zvažil (m_2) a nádobu vrátil zpět do přístroje.

Do horní části přístroje jsem vložil dvě síta na zachycení kameniva. Spodní síto s velikostí ok $0,063$ mm a horní síto s velikostí ok 2 mm. Dále jsem mohl zapnout odstředivku, která slouží k oddělení jemných částic od asfaltového pojiva. Na horní síto jsem opatrně nalil asfalt oddělený od kameniva a pomocí tetrachlorethylenu jsem nádobu vypláchnul takovým způsobem, aby se veškerý obsah nádoby dostal přes horní síto do přístroje. Směs kameniva na horním síte jsem proplachoval rozpouštědlem dostatečně dlouho tak, aby se veškeré pojivo odplavilo.

Po dokončení proplachování a odstředování jsem vyjmul síta s kamenivem, nádobu s jemnými částicemi a umístil jsem je do odvětrávané sušárny. Kamenivo jsem

vysoušel při teplotě $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ do ustálené hmotnosti. Dále jsem zvážil kovovou nádobu s filtračním papírem a jemnými částicemi (m_3) a kamenivo z obou sít (m_4).

Výpočet hmotnosti extrahovaného pojiva:

(1)

$$a = 1 - \frac{m_4 + (m_3 - m_2)}{m_1} \times 100$$

- a obsah rozpustného pojiva obsaženého ve směsi, v %
m₁ hmotnost vysušeného R - materiálu, v g
m₂ hmotnost nádoby s filtračním papírem, v g
m₃ hmotnost nádoby s filtračním papírem a jemnými částicemi, v g
m₄ hmotnost vysušeného kameniva, v g. [19]

V dalším kroku bylo potřeba oddělit tetrachlorethylen od asfaltového pojiva. K tomuto účelu jsem použil rotační vakuové destilační zařízení, které lze vidět na obrázku č. 21. Do stroje jsem pomocí svorek umístil jímací a destilační nádoby natřené vazelínou. Rotace destilační baňky jsem nastavil na (75 ± 15) ot/min a ponořil ji do olejové lázně. Olejová lázeň měla teplotu $(90 \pm 5)^\circ\text{C}$, což je teplota varu tetrachlorethylenu a tlak v přístroji byl 40 kPa.



Obr 21: Vakuové destilační zařízení

Do destilační baňky jsem za pomoci podtlaku nasál roztok asfaltového pojiva s tetrachlorethylenem a směs jsem začal destilovat. Přes soustavu destilačního zařízení začal tetrachlorethylen kondenzovat a odtékat do jímací baňky. Z důvodu velkého množství roztoku byla směs do destilační baňky nasávána po krocích. Po nasátí celého

objemu roztoku jsme zvýšil teplotu v olejové lázni na $(160 \pm 5) ^\circ\text{C}$ a tlak se snížil na 2 kPa. Destilace pokračovala, dokud se nepřestaly na povrchu roztoku tvořit bubliny unikajícího tetrachlorethylenu. Vlastnosti extrahovaného asfaltového pojiva se ověřovaly v dalších zkouškách.

4.2.3 Stanovení čáry zrnitosti

Stanovení zrnitosti kameniva síťovým rozbořem je nutné ke zjištění čáry zrnitosti, která graficky zobrazuje zastoupení zrn ve směsi. Tato zkouška je popsána v normě ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor.

Podstatou zkoušky je rozřídění materiálu pomocí sít s různou velikostí ok. Následně bylo možné zjistit procentuální zastoupení jednotlivých frakcí kameniva v R – materiálu, pro vyhotovení čáry zrnitosti. [20]

V této práci jsem stanovoval čáru zrnitosti pro R – materiál, který jsem používal pro návrh směsi SMA 11S.

Výsledky síťového rozboru kameniva a hodnoty pro čáru zrnitosti stanovila ve své diplomové práci Ing. Markéta Malá. Pro účel této práce jsem použil její výsledky. [33]

4.2.3.1 Zkušební pomůcky

Zkušební síta s velikostí ok 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 5,6; 8; 11,2; 16; 22; 32 mm, nádoba na zrna o velikosti menší než 0,063 mm (filer), prosévací zařízení, sušárna, laboratorní váha s přesností $\pm 0,1$ g, štětec, jehla.

4.2.3.2 Postup zkoušky

Kamenivo získané z R – materiálu po extrakci asfaltového pojiva a po vysušení při $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ bylo vloženo do prosévacího zařízení, ve kterém byla umístěna síta ve správném pořadí, a po dostatečně dlouhou dobu bylo vibrováno tak, aby všechny frakce měly dostatek času projít síty. Po ukončení prosévání byly zváženy hmotnostní zůstatky na jednotlivých sítích. Pro uvolnění zrn zaklíněných na sítích byl použit štětec a jehla.

Pro zjištění čáry zrnitosti byly použity dva vzorky odebrané po homogenizaci z celkového objemu R – materiálu.



Obr 22: Prosévací zařízení

4.2.4 Stanovení penetrace jehlou

Tato zkušební metoda je popsána v normě ČSN EN 1426. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. Penetraci definujeme jako konzistenci vzorku materiálu vyjádřenou jako hloubku v desetinách milimetru, do které svisle vnikne normalizovaná jehla za stanovených podmínek. Tyto podmínky jsou – teplota 25 °C, zatížení 100 g a doba zatěžování 5 s. [21]

4.2.4.1 Zkušební pomůcky

Penetrometr umožňující stanovit penetraci na nejbližších 0,1 mm, penetrační jehla, nádoba na zkušební vzorek, vodní lázeň s konstantní teplotou $25 \pm 0,15$ °C, míchací pomůcka, hadřík, toluen, stopky a teploměr.



Obr 23: Penetrometr

4.2.4.2 Postup zkoušky

Asfaltové pojivo jsem ohřál nad teplotu bodu měknutí a z důvodu přidaných modifikačních přísad v pojivu Colflex 45/80 – 55 jsem vzorek důkladně promíchal, aby došlo k jeho homogenizaci. Pojivo jsem nalil do připravené zkušební nádoby tak, aby po zchlazení vzorku na zkušební teplotu byla jeho výška nejméně o 10 mm větší, než je předpokládaná hloubka vniknutí penetrační jehly. Vzorek jsem nechal zchladnout na okolní teplotu a poté vložil do temperační lázně. Zde zůstal do doby, než dosáhl zkušební teploty ($25 \pm 0,15$) °C.

Následně jsem připravil držák jehly a penetrační jehlu, pro provedení zkoušky. Jehlu jsem očistil toluenem. Celé zařízení muselo být suché a bez jiných cizorodých látek a nečistot. Jehlu jsem vložil do držáku. Celkové zatížení s jehlou bylo $100,00 \text{ g} \pm 0,10 \text{ g}$.

Vytemperovanou nádobu se vzorkem jsem vložil do vodní lázně umístěné v penetračním přístroji. Lázeň měla teplotu ($25 \pm 0,15$) °C. Penetrační jehlu jsem opatrně snížil k povrchu vzorku tak, aby se ho těsně dotýkala a spustil jsem zkoušku. Po 5 s zatěžování jsem odečetl hodnotu penetrace v penetračních jednotkách (penetrační jednotka = 0,1 mm). Tento postup jsem aplikoval na vzorku celkem 3 krát. Místa vpichu byla od sebe, případně od stěny nádoby, vzdálena minimálně 10 mm. Pro každé stanovení hodnoty penetrace jsem penetrační jehlu dokonale očistil toluenem. [21]

4.2.5 Stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička

Tato zkušební metoda je popsána v normě ČSN EN 1427. Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. Ta specifikuje metodu na stanovení bodu měknutí asfaltu a asfaltových poživ v rozmezí od 28 °C do 150 °C.

Bod měknutí je teplota, při které materiál za normalizovaných zkušebních podmínek dosáhne určité konzistence. Zkouška spočívá v ohřevu dvou kotoučů z asfaltového pojiva, které jsou umístěny v mosazných kroužcích ve vodní lázni. Na každém z kotoučů je umístěna ocelová kulička, která se po dosažení určité teploty propadne mosazným kroužkem a asfaltové pojivo se protáhne na vzdálenost ($25,0 \pm 0,4$) mm. Této teplotě se říká bod měknutí. [22]

4.2.5.1 Zkušební pomůcky

Zkušební zařízení, mosazné kroužky, odlévací destička, kuličky, středící prstence, držák kroužků a sestava, vodní lázeň, teploměr, špachtle.



Obr 24: Zařízení na měření bodu měknutí

4.2.5.2 Postup zkoušky

Mosazné kroužky jsem umístil na ocelovou destičku, která se natřela separačním prostředkem ve velmi tenké vrstvě, aby bylo možné později kroužky z podložky odstranit. Asfaltové pojivo předehřáté z předchozí zkoušky „Penetrace jehlou“ jsem vлил do kroužků s mírným přebytkem. Přbytek jsem po vychladnutí na okolní teplotu seříznul tak, aby vznikla rovná plocha.



Obr 25: Předpřipravené vzorky

Předpokládal jsem teplota bodu měknutí v rozmezí 28 °C – 80 °C, tudíž jako kapalina do lázně byla dle normy zvolena vakuovaná destilovaná voda.

Všechny komponenty jsem dal temperovat do lednice na teplotu $(5 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Po vytemperování jsem na kroužky nasadil střední zařízení pro centraci kuliček a vložil je do zařízení. Celá sestava se dala dotemperovat do lednice na 15 minut. Po uplynutí této

doby jsem do nádoby nalil vytemperovanou vakuovanou destilovanou vodou do výšky minimálně (50 ± 3) mm nad horní okraj kroužků. Do sestavy jsem vložil kuličky a opatrně jsem ji ponořil do lázně.

Poté jsem celou sestavu přemístil do zkušebního zařízení, které zespodu kapalinu zahřívalo konstantní rychlostí $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ za minutu. Do kádinky jsem vložil teploměr a zahájil jsem měření. V okamžiku, kdy kulička prošla vzorkem asfaltového pojiva a to se natáhlo na délku (25 ± 4) mm a protřelo světelný paprsek zkušebního přístroje, přístroj automaticky zaznamenal teplotu bodu měknutí. Tato teplota byla zaznamenána pro každou kuličku, přičemž rozdíl mezi nimi u modifikovaných asfaltů může být maximálně $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pokud není, musí se zkouška opakovat. Zkouška se také musí opakovat, pokud kulička poruší vrstvu, kterou je obalena před tím, než přeruší měřicí paprsek, nebo pokud pozorujeme částečné odlepení asfaltu od kuličky.

4.2.6 Laboratorní výroba směsi

Výroba směsi v laboratoři je popsána v normě ČSN EN 12697-35+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 35: Laboratorní výroba směsi. V laboratoři se asfaltové směsi připravují ručním nebo mechanickým mícháním. Obě tyto metody byly v této práci použity. Referenční teplota míchání, která je uvedena v normě, závisí na gradaci silničního asfaltového pojiva. [23]

4.2.6.1 Laboratorní výroba směsi – Ruční míchání

Tento postup se využívá při míchání malých množství směsi v laboratoři a to z důvodu, abychom byli schopni zajistit stejné vlastnosti pro každý zkušební vzorek. V případě, že by jednotlivé vzorky byly odebrány z velkého množství směsi, nemusela by být dodržena správná receptura směsi. V této práci byl využit pro přípravu směsi na zkoušku stanovení maximální objemové hmotnosti směsi a na přípravu zkušebních těles rázovým zhutňovačem. [23]

4.2.6.1.1 Zkušební pomůcky

Sušárna pro ohřev asfaltového pojiva, zkušební navážky a fileru, sušárna pro ohřev R – materiálu, laboratorní váhy, teploměr, špachtle na míchání směsi, nádoba na míchání směsi, elektrická plotýnka s možností regulace teploty a míchací pomůcka na promísení asfaltového pojiva.

4.2.6.1.2 Postup výroby

Před mícháním jsem dal v dostatečném předstihu všechny materiál temperovat do sušárny na potřebnou teplotu – kamenivo, vápencová moučka a asfaltové pojivo na 165°C a R – materiál na 130 °C. Dále jsem do asfaltového pojiva přidal adhezní přísadu Addibit L300 v předepsaném dávkování 0,2 % z celkové hmotnosti asfaltového pojiva a důkladně jsem pojivo promíchal. Pojivo jsem vrátil zpět do sušárny na temperování. Před mícháním jsem do R – materiálu přidal rejuvenátor Storflux ve stanoveném dávkování 0,4 % a nechal ho 10 minut působit. Po 10 minutách jsem mohl začít s mícháním. Na plotýnce v předehřáté míchací nádobě, jsem promísil navážku kameniva s celulózovými vlákny S-CEL 7 a přimíchal R – materiál s rejuvenátorem. Dále jsem do směsi odvážil přesné množství asfaltového pojiva s adhezní přísadou a míchal jsem do doby, než všechna zrna byla obalena pojivem. Dále jsem vmíchal předehřátou vápencovou moučku. Tu jsem vmíchal nadvakrát, aby došlo k dokonalému promísení s pojivem a vytvořil se tzv. mastix. Takto vytvořenou směs jsem přemístil do nádoby a vložil do sušárny k temperaci na teplotu hutnění 155°C.

4.2.6.2 Laboratorní výroba směsi – Mechanické míchání

Tento postup jsem využil při míchání většího množství směsi v laboratoři a to pro výrobu zkušebních desek.

4.2.6.2.1 Zkušební pomůcky

Laboratorní míchačka, sušárna pro ohřev asfaltového pojiva, zkušební navážky a fileru, sušárna pro ohřev R – materiálu, laboratorní váhy, teploměr, špachtle na míchání směsi, nádoba na míchání směsi, míchací pomůcka na promísení asfaltového pojiva.



Obr 26: Uzavřené míchací zařízení



Obr 27: Lopatky míchacího zařízení

4.2.6.2.2 Postup výroby

Před mícháním jsem dal v dostatečném předstihu všechny materiál temperovat do sušárny na potřebnou teplotu – kamenivo, vápencová moučka a asfaltové pojivo na 165 °C a R – materiál na 130 °C. Dále jsem do asfaltového pojiva přidal adhezní přísadu Addibit L300 v předepsaném dávkování 0,2 % z celkové hmotnosti asfaltového pojiva a důkladně jsem pojivo promíchal. Pojivo jsem vrátil zpět do sušárny na temperování. Před mícháním jsem do R – materiálu přidal rejuvenátor Storflux ve stanoveném dávkování 0,4 % a nechal ho 10 minut působit. Po 10 minutách jsem mohl začít s mícháním. Do předehřáté nádoby míchačky jsem vsypal navážku kameniva s celulózovými vlákny S-CEL 7 a tuto směs jsem promíchal. Poté jsem přisypal R – materiál s rejuvenátorem a opět promíchal. Dále jsem so směsí odvážil přesné množství asfaltového pojiva s adhezní přísadou a směs se míchala do doby, než všechna zrna byla obalena pojivem. V nádobě míchačky bylo potřeba pomocí špachtle manuálně promísit neobalená zrna. Dalším krokem bylo vmíchání předehřáté vápencové moučky. Tu jsem vmíchal nadvakrát, aby došlo k dokonalému promísení s pojivem a byl vytvořen tzv. mastix. Takto vytvořenou směs jsem přemístil do nádoby a vložil do sušárny k temperaci na teplotu hutnění 155°C k přípravě deskových zkušebních těles. [23]

4.2.7 Stanovení maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi

Maximální objemová hmotnost směsi je hmotnost při dané zkušební teplotě připadající na jednotku objemu asfaltové směsi bez mezer. Společně s objemovou hmotností se používá především k výpočtu obsahu mezer ve ztuhnutém vzorku a dalších vlastností vztahujících se k jejímu objemu. [24]

Tato zkušební metoda je popsána v normě ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. V této normě jsou popsány tři postupy zjištění maximální objemové hmotnosti – volumetrický, hydrostatický a matematický. Pro účely této práce jsem použil volumetrický postup.

U volumetrického postupu se objem vzorku měří jako objem vody nebo rozpouštědla vytěsněného vzorkem v pyknometru. V této práci jsem pro stanovení maximální objemové hmotnosti směsi použil dva pyknometry s objemem 500 ml, pro

naplnění odvzdušněnou destilovanou vodou a jeden pyknometr o objemu 1000 ml, pro naplnění rozpouštědlem (tetrachlorethylenem). [24]

4.2.7.1 Zkušební pomůcky

Pyknometr s těsně přiléhajícím nástavcem, sušárna s nucenou ventilací, odvzdušněná voda, rozpouštědlo (tetrachlorethylen), špachtle, laboratorní váhy s přesností 0,1 g, teploměr, vodní lázeň a alobal.

4.2.7.2 Postup zkoušky

Zkušební vzorek jsem dal temperovat na teplotu 110 °C do sušárny. Pomocí špachtle a pomocí rukou jsem vzorek rozdělil na částice a shluky, jejichž velikost byla maximálně 6 mm. Pokud nebyl materiál dostatečně měkký tak, aby šel rozdělít ručně, zahříval jsem jej v sušárně při teplotě 110 °C do doby, kdy rozdělení bylo možné.



Obr 28: Rozdělený vzorek asfaltové směsi

Stanovil jsem hmotnost prázdného pyknometru s nástavcem (m_1) o známém objemu (V_p) a připravený zkušební vzorek jsem opatrně přemístil do pyknometru a nechal jsem ho zchladnout na okolní teplotu. Poté jsem stanovil hmotnost pyknometru s nástavcem a vysušeným vzorkem (m_2). Tento postup jsem provedl pro každý pyknometr zvlášť.



Obr 29: Prázdný pyknometr



Obr 30: Pyknometr se vzorkem



Obr 31: Vzorek zalitý odvzdušněnou vodou

Pyknometr o objemu 1000 ml se zkušebním vzorkem, jsem naplnil rozpouštědlem maximálně 30 mm pod okraj, nasadil nástavec a umístil jsem jej na rotační míchací zařízení, aby došlo k promíchání směsi. Po 10 minutách jsem pyknometr přemístil do temperační lázně na dobu 120 minut. Po uplynutí této doby jsem pyknometr doplnil vytemperovaným rozpouštědlem po rysku na nástavci, vyjmul jsem ho z lázně, osušil a pyknometr jsem zvažil (m_3).

Pyknometry o objemu 500 ml, se zkušebním vzorkem, jsem naplnil odvzdušněnou destilovanou vodou maximálně 30 mm pod okraj, ručně promíchány a byly umístěny do vakuového zařízení, které odstranilo přebytečný vzduch z mezer směsi. Vzorky jsem ponechal v zařízení po dobu 15 minut při zbytkovém tlaku 4 kPa. Po uplynutí této doby jsem vzorky přemístil do temperační lázně na dobu 120 minut a teplotě $(25 \pm 0,2) ^\circ\text{C}$. Po uplynutí této doby jsem pyknometr doplnil vytemperovanou odvzdušněnou destilovanou vodou po rysku na nástavci, vyjmul jsem ho z lázně, osušil a pyknometr jsem zvažil (m_3). Rozdíl výsledků mohl být maximálně o 20 kg/m^3 .



Obr 32: Vakuové zařízení

Výpočet maximální objemové hmotnosti asfaltové směsi - volumetrický postup

(2)

$$\rho_{mv} = \frac{m_3 - m_1}{10^3 \times V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w}$$

- ρ_{mv} maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v kg/m^3 , stanovená volumetrickým způsobem, s přesností $0,1 \text{ kg/m}^3$
- m_1 hmotnost pyknometru a nástavcem, v g
- m_2 hmotnost pyknometru, nástavce a zkušební vzorku, v g
- m_3 hmotnost pyknometru, nástavce, zkušební vzorku a vody či rozpouštědla, v g
- V_p objem pyknometru po naplnění po referenční značce nástavce, v m^3
- ρ_w hustota vody nebo rozpouštědla při zkušební teplotě v kg/m^3 [24]

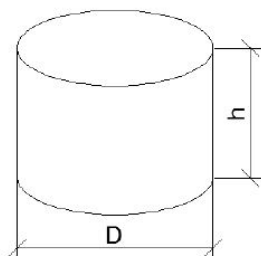
4.2.8 Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem

Tato metoda je popsána v normě ČSN EN 12697-30: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Tato zkušební tělesa byla použita pro stanovení objemové hmotnosti. [25]

Při přípravě těles se asfaltová směs, vyrobená v laboratoři nebo odebraná na staveništi, vytemperuje na potřebnou teplotu, nasype do ocelové formy pro hutnění a poté se zhutňuje v rázovém zhutňovači pomocí hutněního pěchu. Beran pěchu padá z předepsané výšky a požadovaným počtem rázů na horní povrch zkušební tělesa.

Zkušební těleso se poté nechá zchladnout na laboratorní teplotu. Zkušební těleso se nazývá „Marshallovo.“ [25]

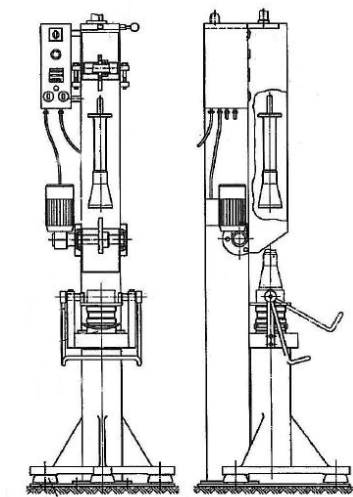
Rozměry zkušebního tělesa musí mít tvar válce o průměru $D = (101,6 \pm 0,1)$ mm a výšce $h = (63,5 \pm 2,5)$ mm.



Obr 33: Rozměry zkušebního tělesa

4.2.8.1 Zkušební pomůcky

Rázový zhutňovač s dřevěným blokem, motorovým pohonem a počítadlem cyklů, ocelový podstavec, forma pro hutnění, ocelový nástavec, ocelová násypka, špachtle, sušárna pro ohřev forem a asfaltové směsi, teploměr a separační papírová kolečka o průměru formy k oddělení dna směsi a beranu pěchu od asfaltové směsi.



Obr 34: Schéma rázového zhutňovače



Obr 35: Rázový zhutňovač

4.2.8.2 Postup výroby zkušebních těles

Asfaltovou směs vyrobenou dle postupu v kapitole 4.2.6.1 *Laboratorní výroba směsi – Ruční míchání* jsem dal temperovat do sušárny na předepsanou teplotu hutnění

155 °C. Celou sestavu forem pro hutnění jsem dal také temperovat na předepsanou teplotu hutnění 155 °C. Po vytemperování jsem formu sestavil. Na dno formy jsem vložil separační papír. Vyjmul jsem směs ze sušárny a pomocí špachtle natřikrát ji vsypal do formy. Na horní povrch směsi jsem vložil druhý separační papír a takto připravenou sestavu jsem vložil a upevnil do rázového zhutňovače. Odaretoval jsem beran pěchu a spustil jsem hutnění 50 údery. Poté jsem formu otočil a hutnil jsem dalšími 50 údery. Zhutněnou sestavu jsem vyjmul ze zhutňovače, odstranil separační papíry a nechal zchladnout. Po částečném zchladnutí jsem za pomoci výtlačného zařízení Marshallovo zkušební těleso vytlačil z formy a nechal vychladnout na teplotu okolního prostředí.



Obr 36: Marshallovo těleso



Obr 37: Marshallovo těleso

4.2.9 Příprava zkušební těles zhutňovačem desek

Problematickou přípravu zkušebních těles zhutňovačem desek se zabývá norma ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. V normě jsou popsány tři metody hutnění vzorku – hutnění jedním nebo dvěma koly opatřenými pneumatikou, hutnění hladkým ocelovým válcem a hutnění ocelovými lamelami. [26]

Pro účely této práce jsem zvolil variantu hutnění ocelovými lamelami (lamelový zhutňovač), ale po vytvoření několika zkušebních desek jsem zjistil, že pro zkoušenou směs typu SMA 11S s 30 % a s 50 % RAP SMA není lamelový zhutňovač schopen směs zhutnit na požadovanou míru zhutnění (100 ± 1 %). Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena nedostatečným tlakem vyvozeným na lamely zhutňovače a tuhou kastrou směsi typu SMA.

Proto jsem zvolil druhou variantu – hutnění hladkým ocelovým válcem (segmentový zhutňovač), který byl schopen asfaltovou směs zhutnit na požadovanou míru zhutnění (100 ± 1 %).



Obr 38: Lamelový zhutňovač



Obr 39: Segmentový zhutňovač

4.2.9.1 Zkušební pomůcky

Segmentový zhutňovač, sušárna pro ohřev asfaltové směsi hutnicí forma, podkladní plech, horní ochranný plech, špachtle, teploměr, separační směs na vytření formy pro vyjmutí desek, štětec.

4.2.9.2 Postup výroby zkušebních desek

Asfaltovou směs o potřebné hmotnosti vyrobenou dle postupu v kapitole 4.2.6.2 *Laboratorní výroba směsi – Mechanické míchání* jsem dal temperovat do sušárny na předepsanou teplotu hutnění 155 °C.

Na dno formy jsem vložil podkladní ocelový plech, přiklopil jsem druhou část formy a formu jsem zajistil. Celou sestavu jsem vymazal separační směsí ve velmi tenké vrstvě. Poté jsem vytemperovanou směs vsypal do formy a pomocí špachtle jsem ji vtlačil do krajů a urovňal. Na horní povrch směsi jsem vložil ochranný plech a spustil jsem proces hutnění na požadovanou výšku desky. Nahutněnou zkušební desku jsem přemístil mimo hutnicí zařízení k vychladnutí.



Obr 40: Měření teploty na povrchu směsi



Obr 41: Proces hutnění směsi

4.2.10 Stanovení objemové hmotnosti zkušebních těles

Objemová hmotnost je hmotnost při dané zkušební teplotě, připadající na jednotku objemu zkušebního tělesa včetně mezer. Tímto zkušebním postupem se zabývá norma ČSN EN 12697-6. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa.

V této normě je popsán postup pro zjištění objemové hmotnosti pro čtyři typy povrchů těles – suchý povrch, nasycený suchý povrch, otevřený nebo hrubý povrch a pravidelný povrch. Pro účely této práce byl využit výpočet objemové hmotnosti s nasyceným suchým povrchem. [27]

Objemová hmotnost jsem stanovoval na Marshallových zkušebních tělesech vytvořených dle postupu v kapitole 4.2.8 *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem* a také na zkušebních deskách vytvořených dle postupu v kapitole 4.2.9 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek*.

4.2.10.1 Zkušební pomůcky

Marshallova zkušební tělesa, zkušební desky, teploměr, laboratorní váhy s přesností 0,1 g, hadr na osušení těles, vodní lázeň, úchyt na vážení pod vodou.

4.2.10.2 Postup zkoušky

Každé těleso jsem zvážil za sucha (m_1) a vložil do vodní lázně na dobu 30 minut, aby došlo k vyplnění pórů vodou. Po uplynutí této doby jsem těleso zvážil pod vodou (m_2). Těleso jsem vytáhl z lázně, osušil na povrchu suchým hadrem a zvážil ho (m_3). Před vážením pod vodou byla vždy změřena teplota. Tento postup jsem opakoval pro všechna zkušební tělesa.

Výpočet objemové hmotnosti:

(3)

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3

m_1 je hmotnost suchého tělesa, v g

m_2 je hmotnost tělesa ve vodě, v g

m_3 je hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného, v g

ρ_w hustota vody při laboratorní teplotě, v kg/m^3 . [27]

4.2.11 Stanovení mezerovitosti

Touto zkušební metodou se zabývá norma ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.

Mezerovitost asfaltové směsi je objem mezer ve zkušebním tělese asfaltové směsi vyjádřený v procentech celkového objemu zkušební tělesa. Mezerovitost zkušebních těles bylo potřebné zjistit z důvodu ověření, zda odpovídá požadované mezerovitosti u asfaltových směsí typu SMA, která je 3,0 – 4,5 %. [28]

Výpočet mezerovitosti

Mezerovitost asfaltového zkušební tělesa se vypočítá pomocí maximální objemové hmotnosti směsi a objemové hmotnost zkušební tělesa. Vypočte se dle rovnice:

(4)

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} \times 100$$

V_m je mezerovitost směsi, v %

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkušební tělesa, v kg/m^3

ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost směsi, v kg/m^3

V případě že mezerovitost neleží v požadovaných mezích, je potřeba nový návrh směsi.

4.2.12 Odolnost proti tvorbě trvalých deformací

Touto funkční zkouškou se zabývá norma ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Tato norma popisuje zkušební postupy pro stanovení náchylnosti asfaltových směsí k trvalé deformaci účinkem zatížení.

Existují celkem tři zkušební zařízení – velké, extra velké a malé. Pro účely této práce bylo jsem použil malé zkušební zařízení a tělesa byla na předepsanou teplotu temperována vzduchem. První zkušební teplota byla zvolena na normou požadovaných 50 °C. Tato je stanovena normou pro všechny typy asfaltových směsí. Druhá zkušební teplota byla zvolena 60 °C. Tato teplota bude nově zavedena v normě 13108-5 jako zkušební teplota pro směsi typu SMA. Důvodem je snaha přiblížit se reálně měřeným teplotám povrchu vozovky v letních měsících. [29]

Podstatou zkoušky na malém zkušebním zařízení je pojezd gumového kola v 10 000 cyklech, které je zatíženo silou (700 ± 10) N, kde senzor zaznamenává hloubku vyjeté koleje ve zkušebním tělese. [29]

4.2.12.1 Zkušební pomůcky

Malé zkušební zařízení pro zkoušku trvalých deformací, zkušební tělesa, forma, závaží, igelitová fólie, sušárna.

4.2.12.2 Postup zkoušky

Dvě vyrobené zkušební desky dle postupu v kapitole 4.2.9 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek* jsem upevnil do forem a dal je temperovat na první požadovanou zkušební teplotu 50 °C do sušárny. Po uplynutí doby potřebné pro temperaci vzorků jsem tělesa přemístil a upevnil do vytemperovaného zkušebního zařízení a zahájil jsem měření. Před samotným vložením do forem jsem zjistil přesné rozměry zkušebních těles, hmotnost, objemová hmotnost, míra zhutnění a mezerovitost.



Obr 42: Vložený rám se zkušební deskou



Obr 43: Zkušební kolo s vloženým zatížením



Obr 44: Proces měření

4.2.12.3 Vyhodnocení zkoušky

Z měření jsem získal hodnoty jednotlivých deformací po každém cyklu zatěžování na obou zkušebních vzorcích. Z výsledků jsem dále zjišťoval přírůstek hloubky vyjeté koleje vypočítaný jako průměrná hodnota, o kterou narůstá hloubka koleje opakovanými pojezdy zatěžovacího kola na vzduchu (WTS_{AIR}) a poměrnou hloubku vyjeté koleje zkoušené asfaltové směsi po N zatěžovacích cyklech na vzduchu (PRD_{AIR}).

(5)

$$PRD_{AIR} = \frac{Y_{S,10000}}{t} \times 100$$

PRD_{AIR}	poměrná hloubka vyjeté koleje asfaltové směsi na vzduchu po 10 000 cyklech, v %
$Y_{S,10000}$	průměrná hloubka koleje z obou desek po 10 000 cyklech, v mm
t	průměrná tloušťka zkušebních těles, [29]

(6)

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}$$

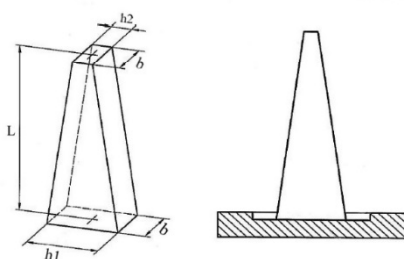
WTS_{AIR} přírůstek hloubky vyjeté koleje, v mm/10³

d_{10000}, d_{5000} hloubka vyjeté koleje po 10 000 a 5 000 cyklech, v mm. [29]

4.2.13 Měření modulů tuhosti

Touto zkušební metodou se zabývá norma ČSN 12697-26 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26:Tuhost.

Cílem této normy je charakterizovat tuhost asfaltových směsí pomocí alternativních zkoušek. Tyto zkoušky se provádějí na zhutněném asfaltovém materiálu při vynuceném ustáleném harmonickém zatížení. Tento postup může být použit pro určení přibližného chování celé konstrukce vozovky. Pro účely této práce jsem použil zařízení na měření modulů tuhosti z laboratoře PKO a jako zkušební tělesa byly použity vetknuté komolé klíny. [30]



Obr 45: Schéma zkušebního komolého klínu [30]



Obr 46: Zkušební zařízení na měření modulů tuhosti

4.2.13.1 Zkušební pomůcky

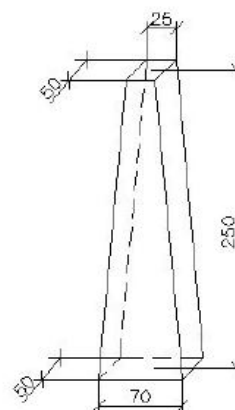
Zkušební zařízení, které je schopné vyvinout harmonické zatížení, termostatická odvětrávací komora se schopností temperovat vzorky na potřebnou teplotu po dobu průběhu zkoušky, kovové podkladní destičky a háčky, epoxidové lepidlo, laboratorní váhy, digitální posuvné měřítko, špachtle, teploměr.

4.2.13.2 Postup zkoušky

Nejdříve bylo potřeba připravit zkušební tělesa ve tvaru komolého klínu. Tato tělesa jsem připravil vyřezáním ze zkušebních desek vytvořených dle postupu v kapitole 4.2.9 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek* na kotoučové pile s diamantovým kotoučem a vodním chlazením. Tělesa by měla mít přibližně rozměry dle obrázku níže. Z každé desky jsem vyrobil 5 zkušebních těles.



Obr 47: Kotoučová pila



Obr 48: Teoretické rozměry komolého klínu [33]

Jednotlivá tělesa jsem zvažil s přesností na 0,1 g. Dále jsem tělesa změřil pomocí posuvného měřítka a hodnoty jsem zaznamenal pro pozdější použití do výpočtového programu zkušebního zařízení. Podrobné výsledky měření a vážení těles jsou v Příloze 4. Poté bylo potřeba tělesa upevnit na ocelovou podložku pomocí epoxidového lepidla tak, aby po vytvrdnutí lepidla bylo dosaženo vetknutí ve spodní části tělesa. Rozmíchané epoxidové lepidlo jsem pomocí špachtle rozprostřel na podkladní destičku a komolý klín jsem do lepidla vtlačil. Na horní část jsem pomocí lepidla přilepil i háček. Po nalepení všech těles jsem nechal lepidlo 48 h vytvrdnout.

Před měřením modulů tuhosti bylo potřeba zkušební tělesa vytemperovat na potřebnou teplotu. Pro účely této práce jsem zvolil teploty $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po

vytemperování na požadovanou zkušební teplotu jsem těleso upnul do přístroje, do výpočetního programu zadal rozměry a váhu tělesa. Komoru zkušebního zařízení jsem nechal dotemperovat na potřebnou teplotu a zahájil jsem měření. Měření probíhalo po krocích, kdy jsem měnil zatěžovací frekvenci a to v krocích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20Hz, 25 Hz a zpět na 5 Hz. Při každé frekvenci zařízení zaznamenávalo potřebné hodnoty pro výpočet modulů tuhosti. Tento postup jsem opakoval pro všechna tělesa. Z naměřených výsledků jsem vypočítal aritmetický průměr pro jednotlivé frekvence.

Jedná se o zkoušku nedestruktivní, nesmí tedy dojít k poškození tělesa, či k vytržení z epoxidového lepidla.



Obr 49: Uchycení tělesa ve zkušebním zařízení



Obr 50: Připravená zkušební tělesa

4.2.13.3 Vyhodnocení zkoušky

Z měření jsem získal hodnoty vyvozené síly (F), posunu (z) a jejich fázový úhel (Φ). Modul tuhosti se spočítal jako absolutní hodnota komplexního modulu.

Reálná složka E_1 dle rovnice: (7)

$$E_1 = \gamma \times \left[\frac{F}{z} \times \cos(\Phi) + \frac{\mu}{10^3} \times \omega^2 \right]$$

Imaginární složka E_2 dle rovnice: (8)

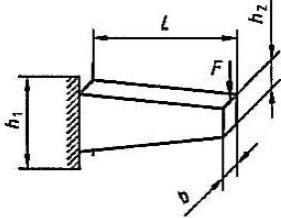
$$E_2 = \gamma \times \left[\frac{F}{z} \times \sin(\Phi) \right]$$

γ faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušebního tělesa

μ faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnosti zkušebního tělesa. [30]

Hodnoty γ a μ závisí na tvaru zkušební tělesa a způsobu upevnění. Pro měřicí metodu, kterou jsem použil v rámci této práce, je můžeme dopočítat dle tabulky:

Tab 1: Stanovení faktoru tvaru γ a faktoru hmotnosti μ . [30]

Druh zatěžování	Faktor tvaru, γ	Faktor hmotnosti, μ
	$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135M + m$
M je hmotnost tělesa a m je hmotnost pohyblivých částí		

Modul tuhosti je potom součtem reálné složky a imaginární složky, dle rovnice:

(9)

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

4.2.14 Stanovení nízkoteplotních vlastností

Touto zkušební metodou se zabývá norma ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem.

Norma specifikuje jednoosé zkoušky tahem pro určení charakteristik odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin při nízkých teplotách. Výsledky lze použít pro vyhodnocení více zkoušek. Pro účely této práce jsem vybral vyhodnocení minimální teploty, kterou je asfaltová směs schopna snést při porušení, pomocí zkoušky nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty (TSRST). [31]

Podstatou této zkoušky je vystavení vzorku s udržovanou konstantní délkou poklesu teploty s konstantní rychlostí. Vlivem zamezení tepelnému smršťování, dochází ve zkušebním tělese k vývinu kryogenního napětí. Výsledkem tohoto šíření dojde k porušení vzorku. [31]

4.2.14.1 Zkušební pomůcky

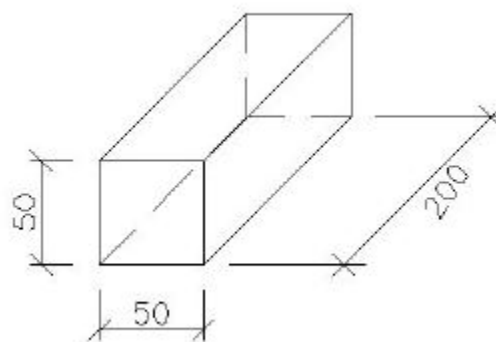
Zařízení vhodné pro provádění zkoušky TSRST, čelisti pro uchycení vzorku, centrační rám, epoxidové lepidlo, špachtle.

4.2.14.2 Postup zkoušky

Nejdříve bylo potřeba připravit zkušební tělesa ve tvaru kvádrů. Tato tělesa jsem připravil vyřezáním ze zkušebních desek vytvořených dle postupu v kapitole 4.2.9 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek* na kotoučové pile s diamantovým kotoučem a vodním chlazením. Tělesa by měla mít přibližně rozměry dle obrázku níže. Z každé desky bylo možné vyrobít 5 zkušebních těles. Zkoušku jsem prováděl na třech zkušebních tělesech a zbylá dvě tělesa byla náhradní.



Obr 51: Připravená zkušební tělesa



Obr 52: Teoretické rozměry zkušebního tělesa [33]

Připravené vzorky jsem vlepil do čelistí pomocí epoxidového lepidla. Při této zkoušce je důležité přesné vycentrování vzorků, čehož jsem dosáhl pomocí centrovacího rámu. Takto nalepený vzorek jsem nechal 48 hodin vytvrdnout v rámu.

Zkušební těleso jsem umístil do zkušebního zařízení našroubováním na závitové tyče. Na čelisti jsem připevnil senzory, které sledovaly, jestli nedochází ke změně délky tělesa vlivem teplotní roztažnosti. Do měřicího programu jsem zadal rozměry zkušebního tělesa. Před zahájením zkoušky jsem těleso nechal temperovat při počáteční teplotě po dobu 15 minut, aby se vyrovnala tepelná deformace. Po vytemperování bylo možné zkoušku zahájit. Teplota tělesa byla snižována konstantní rychlostí 10 °C/hod, až do porušení.



Obr 53: Uchycený zkušební vzorek



Obr 54: Porušený zkušební vzorek

4.2.14.3 Vyhodnocení zkoušky

Výstupem zkoušky je protokol, kde je uvedena především teplota vzorku při porušení T_{failure} , ve $^{\circ}\text{C}$, napětí při porušení $\sigma_{\text{cry, failure}}$, v MPa, síla při porušení $F_{\text{cry, failure}}$, v kN, počáteční teplota T_0 , ve $^{\circ}\text{C}$ a rychlost řízení teploty dT . Součástí protokolu je graf vyjadřující závislost mezi kryogenním napětím či silou a teplotou T .

4.3 Návrh asfaltových směsí

Cílem této práce bylo navrhnout směs typu SMA 11S s 6,5 % pojiva pro obrusné vrstvy vozovek s využitím vyššího množství R – materiálu ze směsi typu SMA. a to v zastoupení 30 % a 50 %. Pro účely této práce jsem použil R – materiál od firmy Froněk, spol. s r.o. Tento R – materiál byl odfrézován z obrusné vrstvy typu SMA a nese označení „RAP SMA.“ Pro návrh směsí bylo nutné znát vlastnosti použitých vstupních materiálů.

Prvním krokem potřebným pro návrh směsi je zjistit vlastnosti R – materiálu a to jsou zrnitost a obsah asfaltového pojiva. Vlastnosti kameniva jsou zobrazeny v kapitole 4.1.1 *Kamenivo* Z R – materiálu jsem vyextrahoval pojivo, dle postupu v kapitole 4.2.2 *Znovuzískání extrahovaného pojiva*, poté jsem přistoupil ke zjištění čáry zrnitosti dle postupu v kapitole 4.2.3 *Stanovení čáry zrnitosti*.

4.3.1 Stanovení obsahu pojiva v R - materiálu

Pro stanovení obsahu pojiva jsem odebral dva vzorky R – materiálu s označením RAP SMA_I a RAP SMA_{II}. V tabulce níže jsou zobrazeny hodnoty po extrakci pojiva.

Zjistil jsem, že R – materiál obsahuje 6,4 % asfaltového pojiva z celkové hmotnosti zkušební vzorku. Množství asfaltového pojiva obsaženého v R-materiálu bylo následně odečteno z celkového množství asfaltového pojiva ve směsi.

Tab. 7: Extrakce pojiva z R - materiálu

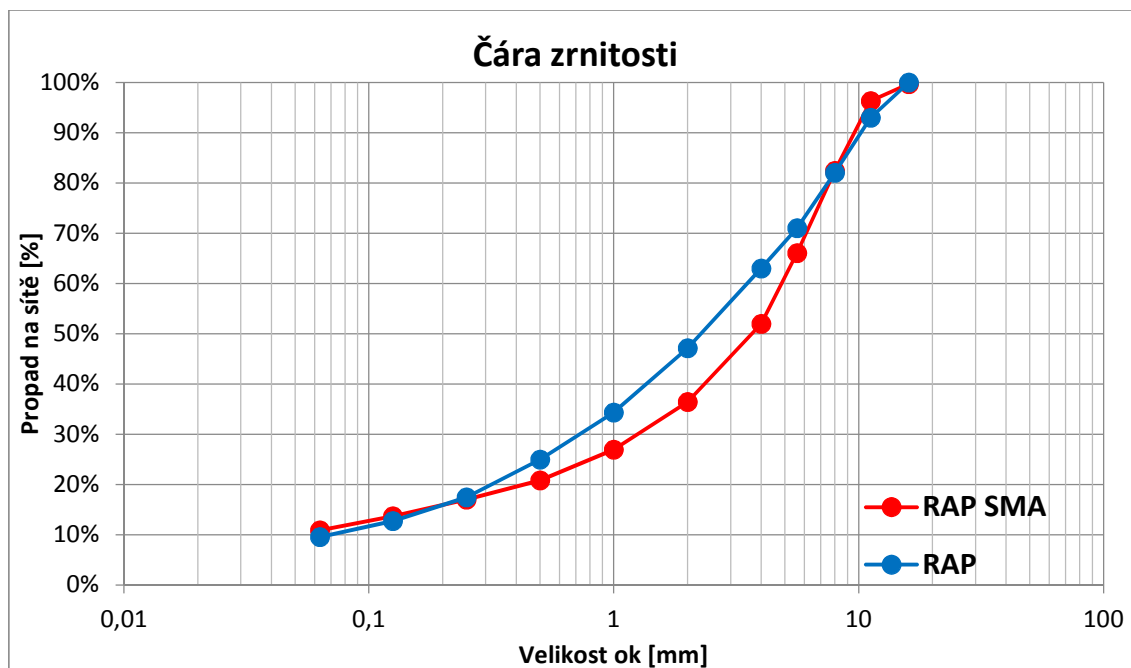
Ozn.	M ₁	M ₂	M' ₂	Ztráta na sítích	P	Kontrola ≤ 1 %	Filer na patroně	obsah pojiva	
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]	[%]
I	1250,0	1059,8	1060,2	-0,4	125,5	98,5%	109,5	80,7	6,46%
II	1250,0	1062,6	1062,5	0,1	121,9	98,7%	108,4	79	6,32%
Průměr								6,4%	

4.3.2 Sítový rozbor

Po extrakci pojiva byl na vzorcích RAP SMA_I a RAP SMA_{II} stanoven sítový rozbor homogenizovaného R-materiálu. Na grafu č. 1 lze vidět srovnání čar zrnitosti R – materiálu vyfrézovaného ze směsi typu SMA (RAP SMA), který jsem použil v této práci já a také pro R-materiál, který použil pro návrh směsi SMA 11S s 30 % R – materiálu Bc. Vojtěch Motl. V jeho případě se jedná o „běžný“ R-materiál, který se ve většině případů používá v rámci ČR a to tak, že se vyfrézují všechny asfaltové vrstvy naráz. Díky tomu se čára zrnitosti blíží plynulé křivce, která odpovídá směsi typu asfaltový beton. Z toho důvodu bylo maximální možné přidané množství R-materiálu do nové směsi omezeno, protože by nešlo s větším množstvím dosáhnout lomené čáry zrnitosti, která je požadována pro směsi typu SMA. Běžný R-materiál jsem v tabulkách označil jako RAP. Dle průběhu RAP SMA lze vidět, že je zachována lomená čára zrnitosti i po vyfrézování a předrcení materiálu.

Tab. 8: Sítový rozbor

Označení materiálu	Velikost síta										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
RAP SMA I. [g]	0,0	43,7	150,8	190,0	166,0	188,8	113,9	72,8	45,6	39,7	32,8
RAP SMA II. [g]	7,2	36,1	180,9	194,2	162,3	175,8	108,1	69,8	43,7	38,8	32,2
RAP SMA ø [g]	3,6	39,9	165,9	192,1	164,1	182,3	111,0	71,3	44,6	39,3	32,5
RAP SMA ø [%]	0	3	14	16	14	16	9	6	4	3	2,8
RAP SMA ø [%]	100	96	82	66	52	36	27	21	17	14	11
RAP ø [%][34]	100	93	82	71	63	47	34	25	17	13	10



Graf 1: Křivka zrnitosti R – materiálů

4.3.3 Vlastnosti asfaltového pojiva

Na extrahovaném pojivu jsem provedl zkoušky, které jsou uvedeny v kapitolách 4.2.4 Stanovení penetrace jehlou a 4.2.5 Stanovení bodu měknutí – metoda kroužek a kulička. Tyto hodnoty jsou zobrazeny v tabulce níže. Pro porovnání vlastností jsou v tabulce zobrazeny hodnoty asfaltového pojiva vyextrahovaného z R – materiálu, který použil Bc. Vojtěch Motl. V následující tabulce jsou zobrazeny výsledky zkoušek, které jsem provedl na nově přidávaném asfaltovém pojivu Colflex 45/80 – 55.

Tab. 9: Vlastnosti vyextrahovaného asfaltového pojiva

Vyextrahované pojivo ze směsi	penetrace [p.j.]				bod měknutí [°C]		
	1.	2.	3.	Ø	L	P	Ø
RAP SMA	19,6	19,1	20,3	19,7	69,5	69,7	69,6
RAP [34]	25	24	25	24,7	-	-	64,4

Tab. 10: Vlastnosti nově přidávaného asfaltového pojiva COLFLEX 45/80 - 55

COLAS Colflex 45/80 - 55	penetrace [p.j.]				bod měknutí [°C]		
	1.	2.	3.	Ø	L	P	Ø
Colflex 45/80-55	59	58,5	57,5	58,3	73,9	74,6	74,3
Colflex 45/80-55	60,7	60,2	59,7	60,2	72,3	72,3	72,3

4.3.4 Návrh směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA

Návrh směsi vychází z požadavků normy ČSN EN 13108-5. Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 5: Asfaltový koberec mastixový a také ze zkušeností s návrhem směsi typu SMA a ze síťového rozboru R – materiálu, kde se snažíme doplnit čáru zrnitosti tak, aby byla zalomená dle požadavků na směsi typu SMA.

Je nutné dodržet předepsanou mezerovitost z normy ČSN EN 13108-5 v mezích 3,0 % – 4,5 %. Dle revize národní přílohy této normy bude obor mezerovitosti změněn na 2,5 % – 4,0 %.

Pro každý návrh jsem připravil navážky na 3 Marshallova zkušební tělesa dle kapitoly 4.2.8 *Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem* a navážky na stanovení maximální objemové hmotnosti směsi dle kapitoly 4.2.7 *Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Příprava směsi byla provedena dle kapitoly 4.2.6.1 *Laboratorní výroba směsi – Ruční míchání*.

Dávkování nového asfaltového pojiva, adhezní přísady Addibit L300, rejuvenátoru Storflux a celulózových vláken S – CEL 7 zůstalo pro všechny návrhy stejné. A to v procentuálních zastoupeních dle tabulky níže.

Tab. 11: Procentuální zastoupení jednotlivých složek

Asfaltové pojivo	6,5 % z celkové hmotnosti navážky, z toho nové pojivo 4,58 % a pojivo v R – materiálu 1,92 %
Addibit L300	0,2 % z hmotnosti nově přidaného asfaltového pojiva
Storflux	0,4 % z hmotnosti přidaného R - materiálu
S – CEL 7	0,3% z celkové hmotnosti navážky

4.3.4.1 Návrh č. 1

V tabulkách níže je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých komponentů, tak jak jsem je navážil pro návrh č. 1.

Tab. 12: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 1, v %

Frakce	[%]
Vápencová moučka	7,5
0-2	3,5
2-5	9,5
4-8	8,5
8-11	41
R-mat	30

Po namíchání směsi jsem mohl stanovit maximální objemovou hmotnost směsi. Pro návrh č. 1 jsem použil jeden pyknometr o objemu 1000 ml s rozpouštědlem (tetrachlorethylen).

Tab. 13: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 1

Pyknometr	Maximální objemová hmotnost
Velký č. IV.	2551 kg/m ³

Na třech zkušebních Marshallových tělesech jsem dále stanovil objemovou hmotnost dle postupu v kapitole 4.2.10 *Stanovení objemové hmotnosti*. Z těchto hodnot jsem dále stanovil mezerovitost zkušebních těles, dle kapitoly 4.2.11 *Stanovení mezerovitosti*.

Tab. 14: Objemová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 1

Zkušební těleso označení	1	2	3	Průměr
Hmotnost, suchá [g]	1304,7	1285,8	1298,4	1298,4
Hmotnost, pod vodou [g]	789,0	777,0	784,4	784,4
Hmotnost, vlhká [g]	1305,5	1286,2	1298,7	1298,7
Objemová hmotnost $\rho(bssd)$ [kg/m ³]	2520,3	2519,4	2518,8	2519,5
Mezerovitost [%]	1,2	1,2	1,3	1,2

Mezerovitost se musí pohybovat v mezích stanovených pro směsi typu SMA, což je 3,0 – 4,5 %. Tento požadavek pro návrh č. 1 nebyl splněn, a proto jsem musel přistoupit ke změně návrhu. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v Příloze 1.

4.3.4.2 Návrh č. 2

V tabulkách níže je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých komponentů, tak jak jsem je navázil pro návrh č. 2.

Tab. 15: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 2, v %

Frakce	[%]
Vápencová moučka	5,5
0-2	3,0
2-5	9,5
4-8	8,5
8-11	43,5
R-mat	30

Po namíchání směsi jsem mohl stanovit maximální objemovou hmotnost směsi. Pro návrh č. 2 jsem použil jeden pyknometr o objemu 1000 ml s rozpouštědlem (tetrachlorethylen).

Tab. 16: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 2

Pyknometr	Maximální objemová hmotnost
Velký č. II.	2612 kg/m ³

Na třech zkušebních Marshallových tělesech jsem dále stanovil objemovou hmotnost dle postupu v kapitole 4.2.10 *Stanovení objemové hmotnosti*. Z těchto hodnot jsem dále stanovil mezerovitost zkušebních těles, dle kapitoly 4.2.11 *Stanovení mezerovitosti*.

Tab. 17: Objemová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 2

Zkušební těleso označení	4	5	6	Průměr
Hmotnost, suchá [g]	1295,6	1292,2	1313,6	1300,5
Hmotnost, pod vodou [g]	777,5	768,7	786,3	777,5
Hmotnost, vlhká [g]	1297,7	1294,5	1316,3	1302,8
Objemová hmotnost $\rho(bssd)$ [kg/m ³]	2484,6	2451,7	2472,5	2469,6
Mezerovitost [%]	4,9	6,1	5,3	5,4

Mezerovitost opět neležela v požadovaných mezích pro směsi typu SMA, které jsou 3,0 – 4,5 %. Z toho důvodu jsem musel znovu upravit návrh směsi. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v Příloze 1.

4.3.4.3 Návrh č. 3

V tabulkách níže je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých komponentů, tak jak jsem je navázil pro návrh č. 3.

Tab. 18: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 3, v %

Frakce	[%]
Vápencová moučka	6,5
0-2	3,0
2-5	9,5
4-8	8,5
8-11	42,5
R-mat	30

Opět jsem stanovil maximální objemová hmotnost směsi. Tentokrát jsem použil dva pyknometry o objemu 500 ml s vodou a jeden kontrolní pyknometr o objemu 1000 ml s rozpouštědlem (tetrachlorethylen).

Tab. 19: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 3

Pyknometr	Maximální objemová hmotnost
Malý č. I.	2569 kg/m ³
Malý č. VIII.	2566 kg/m ³
Velký č. VI.	2575 kg/m ³

Pro výpočet mezerovitosti jsem zvolil průměrnou hodnotu z pyknometrů ve vodě, která byla 2567 kg/m³.

Tab. 20: Objemová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 3

Zkušební těleso označení	4.1	4.2	4.4	Průměr
Hmotnost, suchá [g]	1078,1	1191,5	1190,0	1190,0
Hmotnost, pod vodou [g]	648,5	714,7	705,6	705,6
Hmotnost, vlhká [g]	1078,3	1192,6	1194,1	1194,1
Objemová hmotnost $\rho(\text{bssd})$ [kg/m ³]	2503,3	2488,2	2430,6	2475,0
Mezerovitost [%]	2,5	3,1	5,3	3,6

U tohoto návrhu vyšla průměrná mezerovitost 3,6 %, což vyhovuje normě. Pro další postup návrhu zkušebních desek jsem volil hodnoty dle návrhu č. 3. Tento návrh směsi byl vhodný pro další postup. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v Příloze 1.

Pro další postup byly uvažovány tyto charakteristiky:

- ♦ Množství pojiva 6,5 %
- ♦ Maximální objemová hmotnost 2567 kg/m³
- ♦ Objemová hmotnost 2475 kg/m³
- ♦ Mezerovitost 3,6 %

4.3.5 Návrh směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA

Návrh směsi vychází z návrhu směsi s obsahem 30 % R – materiálu. Opět bylo snahou vhodně doplnit čaru zrnitosti R – materiálu tak, aby požadavky na směsi typu SMA, ale tentokrát bylo použito 50 % RAP SMA.

Dávkování adhezní přísady Addibit L300, rejuvenátoru Storflux a celulóзовých vláken S – CEL 7 je shodné s návrhem směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA. Celkový objem asfaltového pojiva zůstal 6,5 %, došlo ke změně procentuálního zastoupení nového pojiva oproti pojivu v R – materiálu, viz tabulka níže.

Tab. 21: Procentuální zastoupení jednotlivých složek

Asfaltové pojivo	6,5 % z celkové hmotnosti navážky, z toho nové pojivo 3,3 % a pojivo v R – materiálu 3,2 %
Addibit L300	0,2 % z hmotnosti nově přidaného asfaltového pojiva
Storflux	0,4 % z hmotnosti přidaného R - materiálu
S – CEL 7	0,3% z celkové hmotnosti navážky

4.3.5.1 Návrh č. 1

V tabulkách níže je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých komponentů, tak jak jsem je navázil pro návrh č. 1.

Tab. 22: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 1, v %

Frakce	[%]
Vápencová moučka	3,7
0-2	0,0
2-5	1,0
4-8	7
8-11	38,3
R-mat	50

Po namíchání směsi jsem mohl stanovit maximální objemovou hmotnost směsi. Pro návrh č. 1 jsem použil dva pykometry o objemu 500 ml s vodou a jeden kontrolní pykometr o objemu 1000 ml s rozpouštědlem (tetrachlorethylen).

Tab. 23: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 1

Pyknometr	Maximální objemová hmotnost
Malý č. I.	2584 kg/m ³
Malý č. VIII.	2574 kg/m ³
Velký č. IV.	2578 kg/m ³

Pro výpočet mezerovitosti byla zvolena průměrná hodnota maximální objemové hmotnosti stanovená z pyknometrů ve vodě, která činí 2579 kg/m³.

Na třech zkušebních Marshallových tělesech jsem dále stanovil objemovou hmotnost dle postupu v kapitole 4.2.10 *Stanovení objemové hmotnosti*. Z těchto hodnot jsem dále stanovil mezerovitost zkušebních těles, dle kapitoly 4.2.11 *Stanovení mezerovitosti*.

Tab. 24: Objemová hmotnost pro návrh č. 1

Zkušební těleso označení	1	2	3	Průměr
Hmotnost, suchá [g]	1236,4	1230,2	1237,3	1234,6
Hmotnost, pod vodou [g]	746,0	739,4	740,3	741,9
Hmotnost, vlhká [g]	1241,0	1234,0	1242,8	1239,3
Objemová hmotnost $\rho(bssd)$ [kg/m ³]	2491,6	2483,8	2497,1	2490,8
Mezerovitost [%]	3,4	3,7	3,4	3,5

U tohoto návrhu vyšla průměrná mezerovitost 3,5 %, což vyhovuje požadavkům normy ČSN EN 13108-5. Pro další postup návrhu zkušebních desek jsem volil hodnoty dle návrhu č. 1. Tento návrh směsi byl vhodný pro další postup. Podrobné výsledky zkoušek jsou uvedeny v Příloze 1.

Pro další postup byly uvažovány tyto charakteristiky:

- ♦ Množství pojiva 6,5 %
- ♦ Maximální objemová hmotnost 2579 kg/m³
- ♦ Objemová hmotnost 2490,8 kg/m³
- ♦ Mezerovitost 3,5 %

4.3.6 Příprava zkušebních těles

Po úspěšném návrhu asfaltových směsí z předchozí kapitoly, jsem mohl přistoupit k přípravě zkušebních těles potřebných pro stanovení funkčních vlastností asfaltových směsí. Výroba zkušebních desek je popsána v kapitole 4.2.9 *Příprava zkušební těles zhutňovačem desek*.

Pro každou směs bylo potřeba vyrobit dvě desky pro zkoušku odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací. Dvě desky pro stanovení modulů tuhosti, které byly rozřezány na jednotlivé komolé klíny a jednu desku pro stanovení nízkoteplotních vlastností, která byla rozřezána na zkušební trámečky.

Celkem jsem vyrobil 18 desek, u nichž jsem sledoval především míru zhutnění a mezerovitost. 8 desek nesplňovalo potřebné parametry a musely být vyřazeny. Míra zhutnění se musí pohybovat od $(100 \pm 1) \%$ a mezerovitost od 3,0 do 4,5 %. U desek jsem také stanovoval objemovou hmotnost a měřil jejich rozměry.

Parametry jednotlivých desek pro směs SMA 11S s 30 % RAP SMA a pro směs SMA 11S s 50 % RAP SMA jsou zobrazeny v následujících kapitolách. Podrobné výsledky jsou uvedeny v Příloze 2.

4.3.6.1 SMA 11S s 30 % RAP SMA

V tabulce níže jsou zobrazeny vlastnosti jednotlivých desek, které byly použity pro funkční zkoušky asfaltové směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA.

Tab. 25: Vlastnosti zkušebních desek s 30 % RAP SMA

Označení desky	Tloušťka desky	Objemová hmotnost	Mezerovitost	Míra zhutnění	Provedená zkouška
	[mm]	[kg/m ³]	[%]	[%]	
4.A.1	42,32	2435,1	4,5	99,0	Trvalé deformace
4.A.2	52,48	2453,2	4,4	99,1	Trvalé deformace
4.A.3	51,31	2468,5	3,8	99,7	Modul tuhosti
4.A.4	51,37	2475,7	3,6	100,0	Nízkoteplotní vlastnosti
4.A.5	50,61	2487,5	3,1	100,5	Modul tuhosti

4.3.6.2 SMA 11S s 50 % RAP SMA

V tabulce níže jsou zobrazeny vlastnosti jednotlivých desek, které byly použity pro funkční zkoušky asfaltové směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA.

Tab. 26: Vlastnosti zkušebních desek s 50 % RAP SMA

Označení desky	Tloušťka desky	Objemová hmotnost	Mezerovitost	Míra zhutnění	Provedená zkouška
	[mm]	[kg/m ³]	[%]	[%]	
1.A.1	51,09	2492,8	3,3	100,1	Nízkoteplotní vlastnosti
1.A.2	50,26	2506,3	2,8	100,6	Modul tuhosti
1.A.5	50,18	2500,7	3,0	100,4	Modul tuhosti
1.A.3	41,03	2499,7	3,1	100,4	Trvalé deformace
1.A.4	40,62	2511,4	2,6	100,8	Trvalé deformace

Mezerovitost se u těchto desek pohybovala u spodní hranice použitelnosti, tento fakt byl způsoben vyšší mírou zhutnění jak 100 %, ale méně jak 101 %, desky tedy byly použity, ačkoliv 2 desky by aktuálně nesplnily požadavek minimální mezerovitosti pro směs typu SMA. Z důvodu budoucí změny minimální hranice mezerovitosti na 2,5 %, v národní příloze normy ČSN EN 13108-5, se desky pro následné zkoušení použily.

4.4 Výsledky funkčních zkoušek

4.4.1 Odolnost proti tvorbě trvalých deformací

Postup této zkoušky je popsán v kapitole 4.2.12 *Odolnost proti tvorbě trvalých deformací*.

Zkoušku jsem provedl na obou směsích SMA 11S s 30 % RAP SMA a SMA 11S s 50 % RAP SMA. Pro zkoušku jsem použil 2 zkušební desky od každé směsi. První zkušební teplota byla 50 °C. Druhá zkušební teplota byla 60 °C, pro tuto teplotu byly použity stejné desky otočené na dosud nezkoušenou stranu.

Z naměřených hodnot jsem zjistil hloubku vyjeté koleje po 10 000 cyklech $Y_{S,10}$ a vypočítal jsem průměrnou poměrnou hloubku vyjeté koleje PRD_{AIR} a poměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} . Maximální hodnota PRD_{AIR} dle normy by měla být 5,0 %, maximální hodnota WTS_{AIR} 0,07 mm/1000 cyklů pro SMA 11S. „S“ v označení směsi znamená, že směs má zvýšenou odolnost vůči tvorbě trvalých deformací. Předpoklad tedy byl, že směs vyhoví. Tento předpoklad byl také potvrzen. Podrobné výsledky zkoušky jsou uvedeny v Příloze 3.



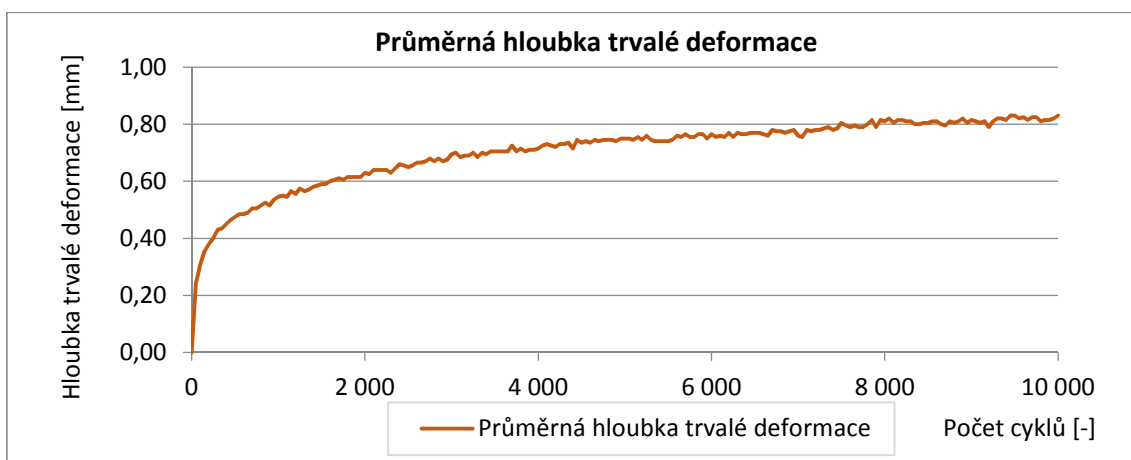
Obr 55: Zkušební desky po zkoušce trvalých deformací

4.4.1.1 Výsledky zkoušky

4.4.1.1.1 SMA 11S s 30% RAP SMA – T = 50 °C

Tab. 27: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 50 °C

Označení	Deska	tloušťka	Y _{S,10}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
4.A.1	L	42,3	0,75	1,55	0,016
4.A.2	P	54,7			

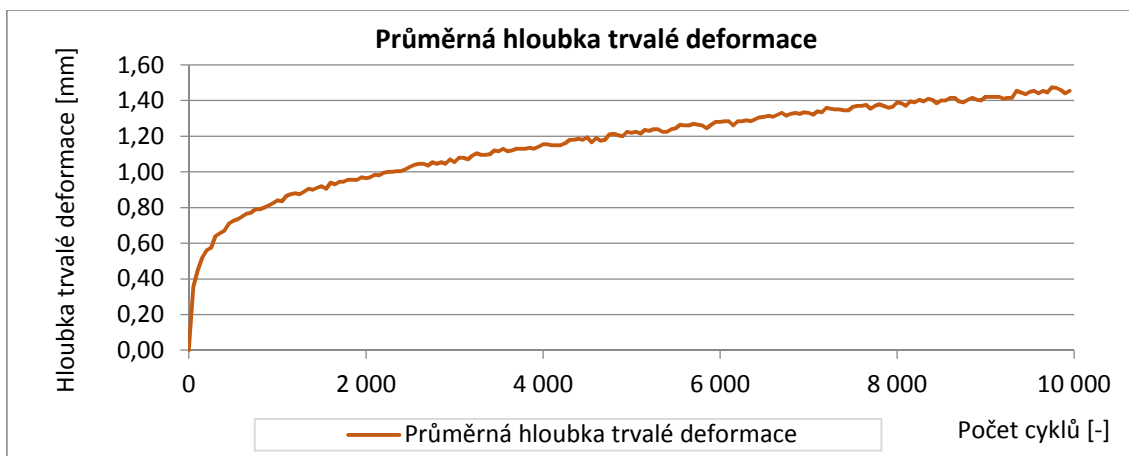


Graf 2: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 30 % RAP SMA, T = 50 °C

4.4.1.1.2 SMA 11S s 30% RAP SMA – T = 60 °C

Tab. 28: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 60 °C

Označení	Deska	tloušťka	Y _{S,10}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
4.A.1	L	42,3	1,22	2,6	0,05
4.A.2	P	54,7			

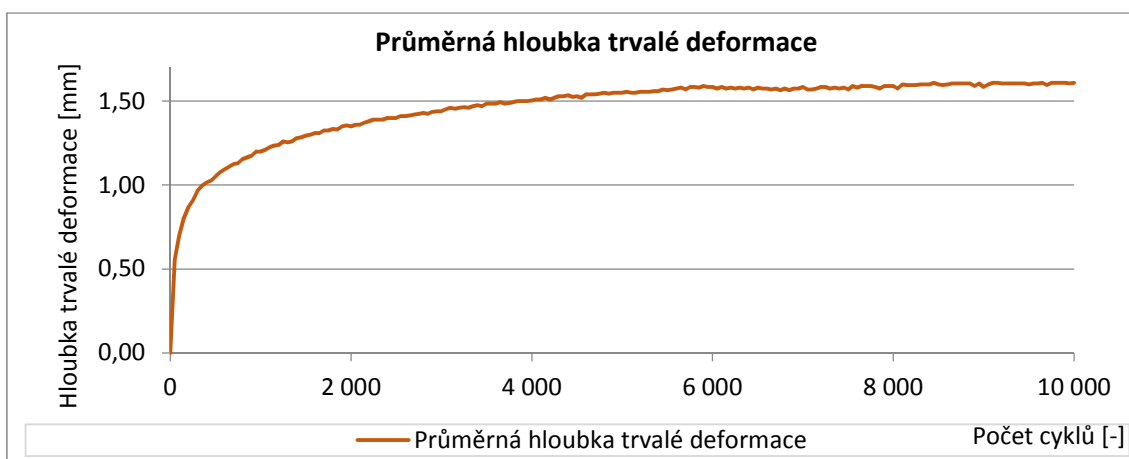


Graf 3: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 30 % RAP SMA, $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.1.1.3 SMA 11S s 50% RAP SMA – $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 29: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Označení	Deska	tloušťka	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
1.A.3	L	41,0	1,55	3,8	0,012
1.A.4	P	40,6			

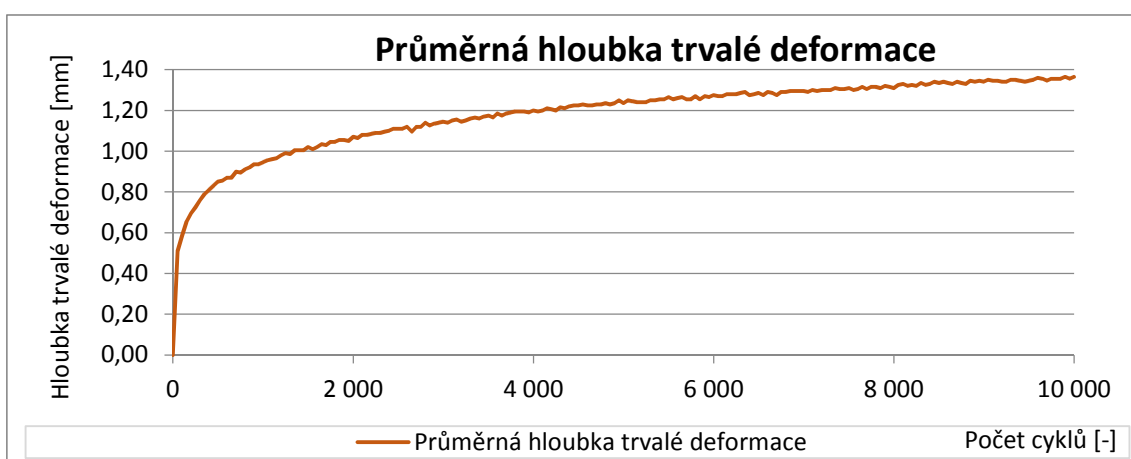


Graf 4: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 50 % RAP SMA, $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.1.1.4 SMA 11S s 50% RAP SMA – T = 60 °C

Tab. 30: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 60 °C

Označení	Deska	tloušťka	Y _{S,10}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
1.A.3	L	41,0	1,24	3,05	0,026
1.A.4	P	40,6			



Graf 5: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 50 % RAP SMA, T = 60 °C

4.4.1.2 Vyhodnocení zkoušky

Z tabulek lze pozorovat, že hloubka vyjeté koleje s rostoucím podílem R – materiálu roste, ale hodnoty PRD_{AIR} a WTS_{AIR} stále vyhovují s rezervou požadavkům z normy. Můžeme tedy říct, že vyšší obsah R – materiálu nijak zásadně neovlivní odolnost směsi proti tvorbě trvalých deformací.

Předpokladem bylo, že se rostoucím množstvím R – materiálu, naměřené hodnoty budou klesat. A to z důvodu zestárlého pojiva v R – materiálu, kterému se díky oxidaci snižuje hodnota penetrace, což znamená, že pojivo tvrdne. Důvodem pro nepotvrzení předpokladu bude použití rejuvenátoru Storflux, který asfaltové pojivo v R – materiálu změkčil.

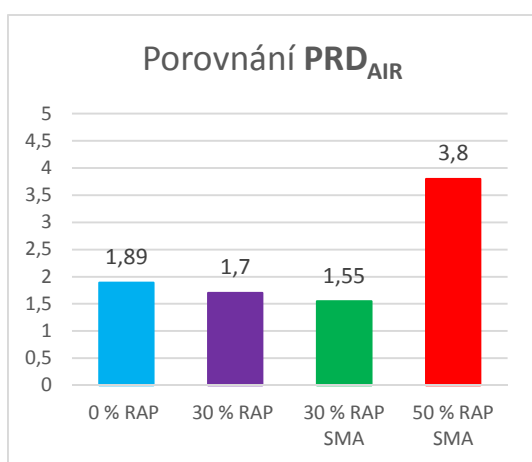
4.4.1.3 Porovnání výsledků

Průměrné hodnoty výsledků zkoušek jsem porovnal se směsí SMA 11S bez použití R – materiálu, kterou ve své diplomové práci navrhla Ing. Markéta Malá [33] a také s výsledky ze směsi SMA 11S s 30 % RAP, kterou ve své bakalářské práci navrhl Vojtěch Motl [34].

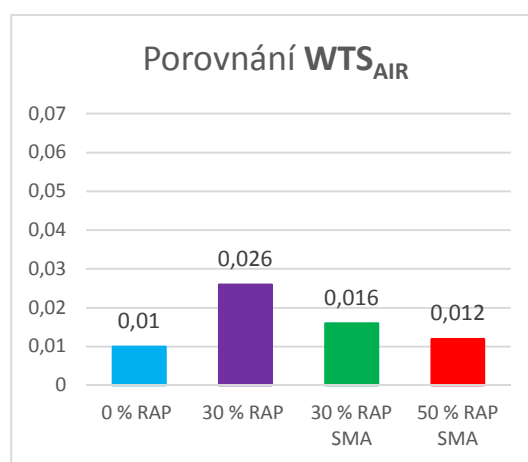
4.4.1.3.1 Zkušební teplota $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 31: Porovnání výsledků při teplotě $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	Požadavek z normy PRD_{AIR}	WTS_{AIR}	Požadavek z normy WTS_{AIR}
SMA 11S	[mm]	[%]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]	[mm/10 ³ cyklů]
0 % RAP [33]	0,78	1,89	5,0	0,010	0,07
30 % RAP [34]	0,69	1,70		0,026	
30 % RAP SMA	0,75	1,55		0,016	
50 % RAP SMA	1,55	3,80		0,012	



Graf 6: Porovnání PRD_{AIR} pro $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

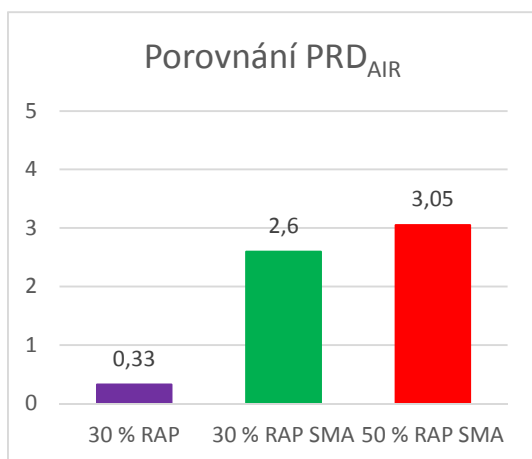


Graf 7: Porovnání WTS_{AIR} pro $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

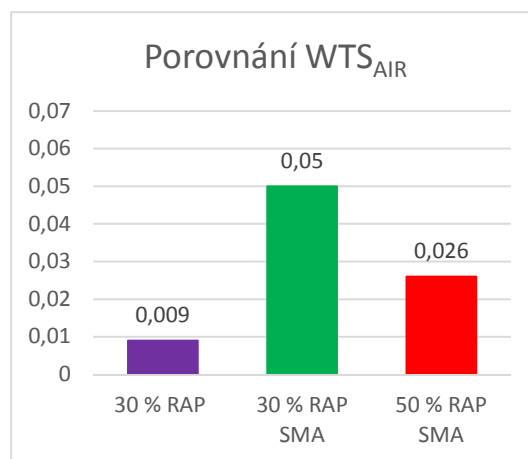
4.4.1.3.2 Zkušební teplota $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 32: Porovnání výsledků při teplotě $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	Požadavek z normy PRD_{AIR}	WTS_{AIR}	Požadavek z normy WTS_{AIR}
SMA 11S	[mm]	[%]	[%]	[mm/ 10^3 cyklů]	[mm/ 10^3 cyklů]
0 % RAP [33]	-	-	5,0	-	0,07
30 % RAP [34]	0,13	0,33		0,009	
30 % RAP SMA	1,22	2,60		0,050	
50 % RAP SMA	1,24	3,05		0,026	



Graf 8: Porovnání PRD_{AIR} pro $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$



Graf 9: Porovnání WTS_{AIR} pro $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.1.4 Vyhodnocení

Z tabulek je patrné, že použití 30 % RAP SMA a 50 % RAP SMA nemá na odolnost proti tvorbě trvalých deformací žádný zásadní vliv. Všechny hodnoty splňují požadavky z normy ČSN EN 13108-5.

4.4.2 Moduly tuhosti asfaltové směsi

Tato zkušební metoda je popsána v kapitole 4.2.13 *Měření modulů tuhosti*.

Pro tuto zkoušku jsem použil 10 zkušebních těles směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA a 10 zkušebních těles ze směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA. Zkouška probíhala při teplotách $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a při frekvencích 5Hz, 10Hz, 15Hz, 20Hz, 25Hz a zpět 5Hz. Podrobné výsledky zkoušky jsou uvedeny v Příloze 5.

Mezní hodnota, $S_{\min} = 5500\text{ MPa}$, kterou musí splňovat směsi typu SMA 11S, podle TP 170 Navrhování vozovek pozemních komunikací, jsou pro zkušební teplotu $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a frekvenci 10 Hz. [35]



Obr 56: Zařízení na měření modulů tuhosti

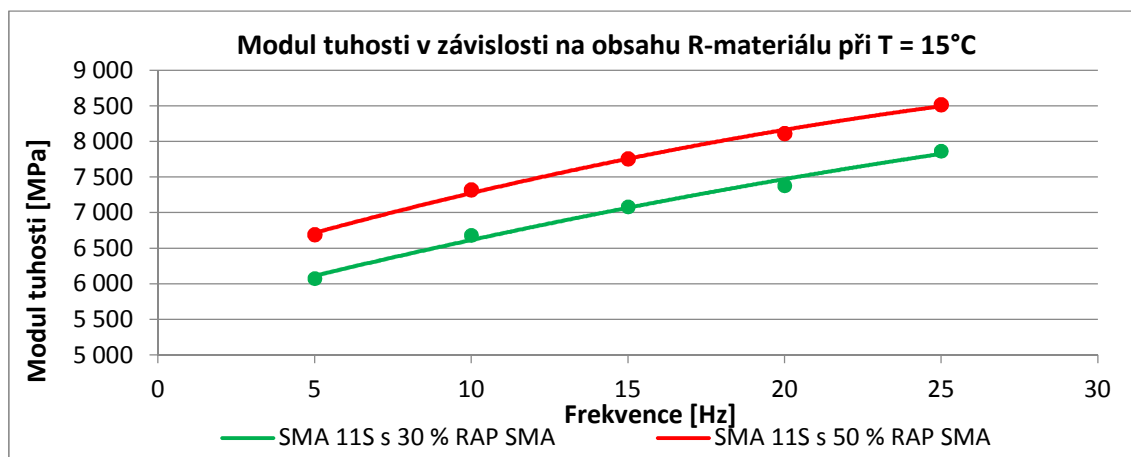
4.4.2.1 Výsledky zkoušky

V tabulkách níže jsou zobrazeny průměrné hodnoty modulů tuhosti pro jednotlivé teploty a frekvence

4.4.2.1.1 Zkušební teplota $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 33: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
30 % RAP SMA	6076	6683	7083	7382	7868
50 % RAP SMA	6691	7321	7760	8111	8521

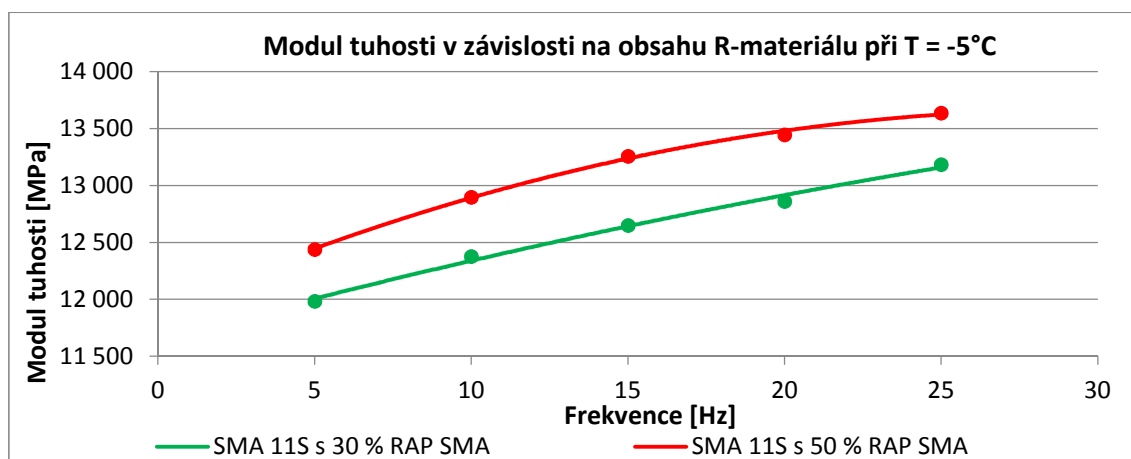


Graf 10: Moduly tuhosti při T = 15 °C

4.4.2.1.2 Zkušební teplota T = -5 °C

Tab. 34: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu T = -5 °C

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
30 % RAP SMA	11985	12379	12652	12863	13184
50 % RAP SMA	12439	12899	13257	13447	13637

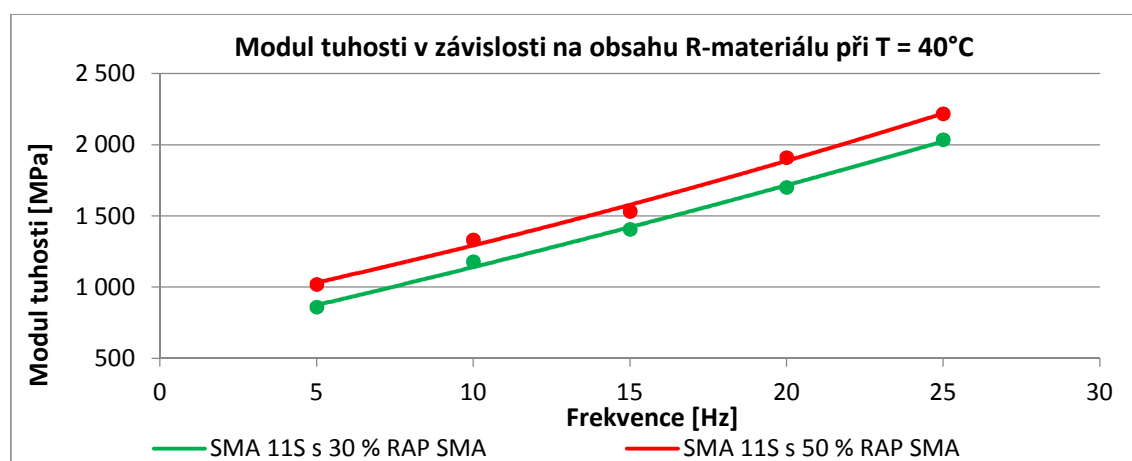


Graf 11: Moduly tuhosti při T = -5 °C

4.4.2.1.3 Zkušební teplota $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 35: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
30 % RAP SMA	858	1177	1404	1699	2034
50 % RAP SMA	1020	1332	1532	1909	2217



Graf 12: Modul tuhosti při $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.2.2 Vyhodnocení zkoušky

Z výsledků je patrné, že s rostoucí teplotou modul tuhosti klesá. Při zvyšování frekvence, v rámci měření jednoho zkušebního tělesa naopak modul tuhosti roste. Směs s 50 % RAP SMA při daných teplotách vykazuje vyšší tuhost. Hodnoty modulů tuhosti pro asfaltovou směs s 30 % RAP SMA jsou nižší pro všechny zkušební teploty i frekvence, tato skutečnost je pravděpodobně způsobena vyšším množstvím nově přidávaného asfaltového pojiva. U směsi s 30 % RAP SMA je to 4,58 % z hmotnosti směsi a u směsi s 50 % RAP SMA je to 3,3 % z celkově přidávaných 6,5 %. Obě směsi splnili požadavek na $S_{\min} = 5500\text{ MPa}$ a to s dostatečnou rezervou.

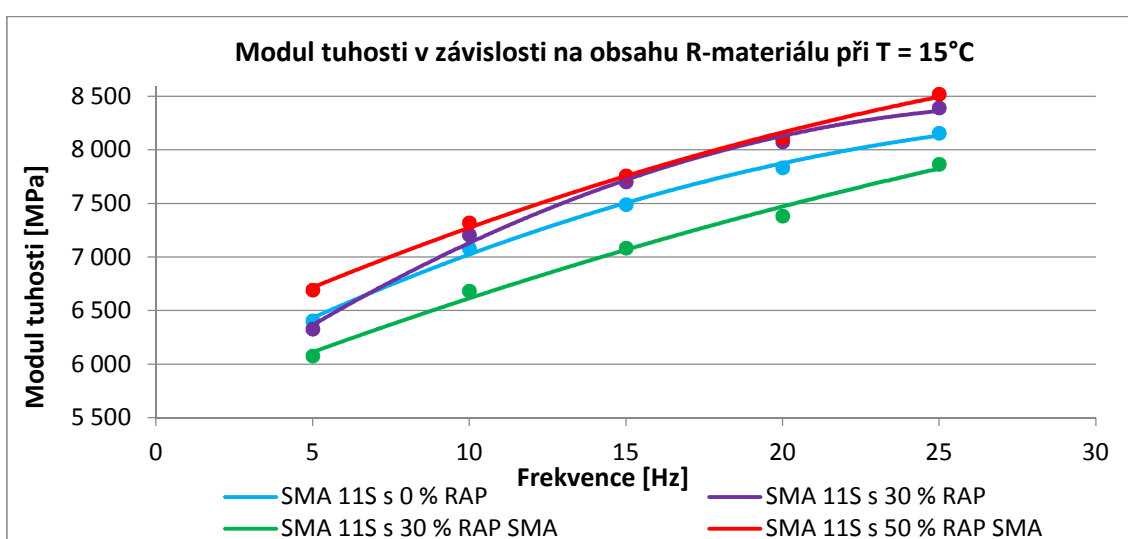
4.4.2.3 Porovnání výsledků

Výsledky zkoušek byly opět porovnány se směsí SMA 11S bez použití R – materiálu, kterou ve své diplomové práci navrhla Ing. Markéta Malá [33] a také s výsledky ze směsi SMA 11S s 30 % RAP, kterou ve své bakalářské práci navrhl Vojtěch Motl [34].

4.4.2.3.1 Zkušební teplota $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 36: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
0 % RAP [33]	6405	7082	7492	7835	8156
30 % RAP [34]	6328	7207	7703	8075	8393
30 % RAP SMA	6076	6683	7083	7382	7868
50 % RAP SMA	6691	7321	7760	8111	8521

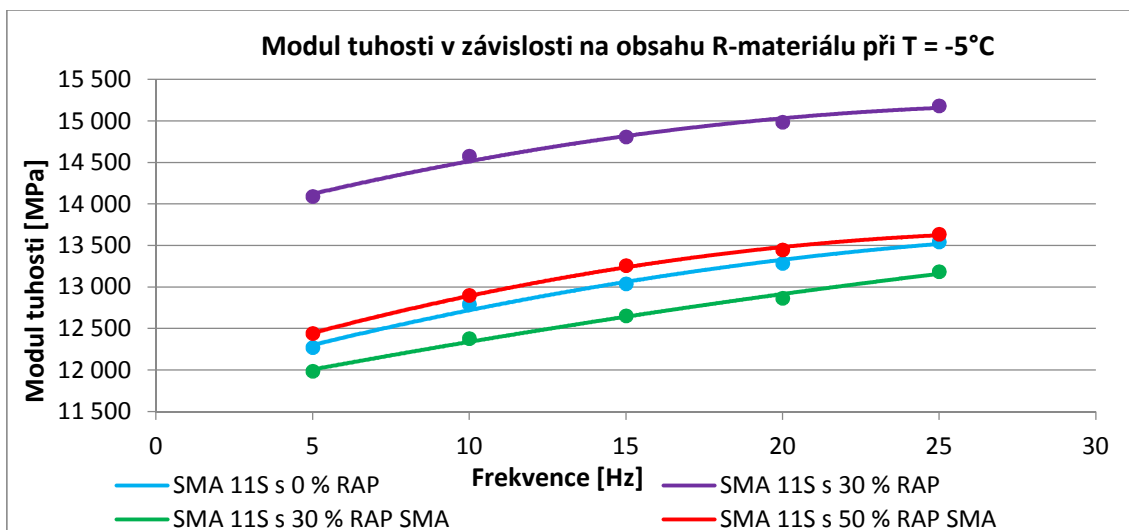


Graf 13: Porovnání modulů tuhosti pro zkušební teplotu $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

4.4.2.3.2 Zkušební teplota $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 37: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
0 % RAP [33]	12269	12793	13040	13285	13544
30 % RAP [34]	14092	14577	14807	14986	15182
30 % RAP SMA	11985	12379	12652	12863	13184
50 % RAP SMA	12439	12899	13257	13447	13637

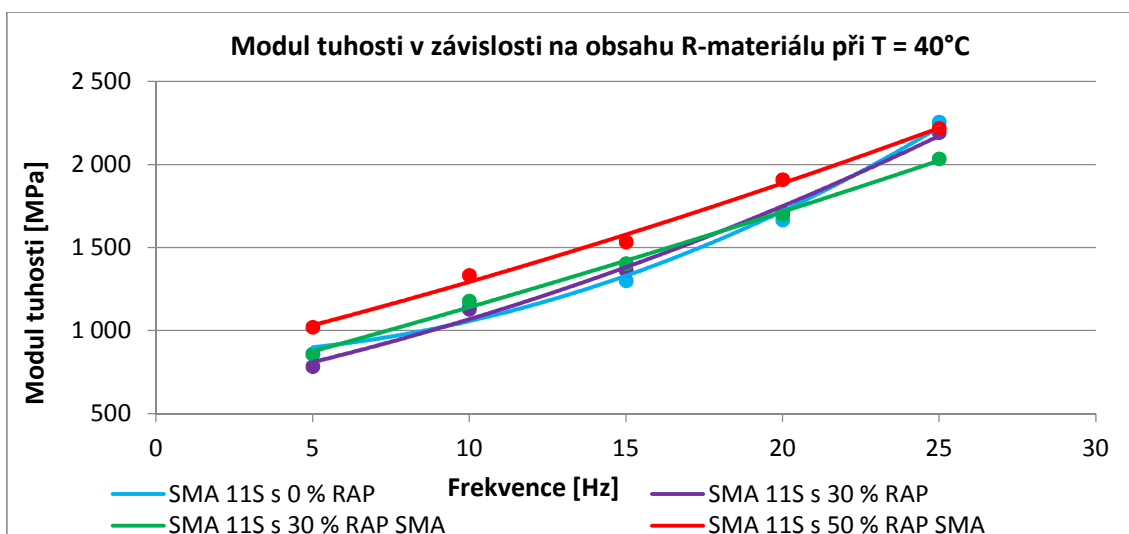


Graf 14: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = -5^{\circ}\text{C}$

4.4.2.3.3 Zkušební teplota $T = 40^{\circ}\text{C}$

Tab. 38: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = 40^{\circ}\text{C}$

SMA 11S	Zatěžovací frekvence				
	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
0 % RAP [33]	858	1149	1300	1667	2255
30 % RAP [34]	783	1128	1362	1715	2192
30 % RAP SMA	858	1177	1404	1699	2034
50 % RAP SMA	1020	1332	1532	1909	2217



Graf 15: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = 40^{\circ}\text{C}$

4.4.2.4 Vyhodnocení

Pro zkušební teplotu $T = 15\text{ °C}$ lze vidět, že směs s 50 % RAP SMA vykazuje nejvyšší hodnoty modulů tuhosti, ale tyto výsledky se nijak zásadně neliší od ostatních směsí.

Pro zkušební teplotu $T = -5\text{ °C}$ vychází výrazně vyšší hodnoty modulů tuhosti u směsi s 30 % RAP. Vzhledem k tomu, že tyto hodnoty byly převzaty z bakalářské práce Vojtěcha Motla, tak se lze pouze domnívat, že mohlo dojít k nedostatečnému rejuvenování (oživení) zestárlého pojiva obsaženého v R-materiálu. Proto je důležité ověřit nízkoteplotní citlivost směsi, zda není příliš křehká. Jinak opět směs s 50 % RAP SMA vykazuje vyšší hodnoty modulů tuhosti než směs referenční a s 30 % RAP SMA, ale nijak výrazně.

Pro zkušební teplotu $T = 40\text{ °C}$ lze říci, že jsou hodnoty modulů tuhosti pro všechny směsi téměř totožné.

Obecně můžeme konstatovat, že získané hodnoty modulů tuhosti vycházejí, mimo zkušební teplotu $T = -5\text{ °C}$, při všech zkušebních teplotách srovnatelně. Můžeme tedy říci, že přidání R – materiálu do směsi typu SMA 11S nijak zásadně neovlivní ani výsledky modulů tuhosti.

4.4.3 Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi

Postup této zkušební metody je popsán v kapitole 4.2.14 *Stanovení nízkoteplotních vlastností*

Zkoušku jsem prováděl na 6 zkušebních trámečcích. Tři pro směs SMA 11S s 30 % RAP SMA a tři pro směs SMA 11S s 50 % RAP SMA

Hlavními parametry, které jsem zjišťoval při stanovování nízkoteplotních vlastností, jsou maximální síla při porušení vzorku, ze které lze určit maximální napětí při porušení. Dále teplota v komoře při porušení a teplota vzorku při porušení, která je hlavním parametrem. Podrobné výsledky zkoušky jsou uvedeny v Příloze 6.



Obr 57: Zařízení na měření nízkoteplotních vlastností

4.4.3.1 Výsledky zkoušky

4.4.3.1.1 Směs SMA 11S s 30 % RAP SMA

V tabulce níže jsou zobrazeny průměrné hodnoty z protokolu zkoušky nízkoteplotních vlastností.

Tab. 39: Hodnoty zkoušky nízkoteplotních vlastností pro SMA 11S s 30 % RAP SMA

SMA 11S s 30 % RAP SMA	4.A.4_1	4.A.4_2	4.A.4_3	Průměr
Maximální síla při porušení [kN]	10,78	10,40	10,50	10,56
Max. napětí při porušení [MPa]	4,31	4,16	4,20	4,22
Teplota v komoře při porušení [°C]	-26,90	-28,40	-29,30	-28,20
Teplota vzorku při porušení [°C]	-23,40	-24,40	-25,40	-24,40

4.4.3.1.2 Směs SMA 11S s 50 % RAP SMA

V tabulce níže jsou zobrazeny průměrné hodnoty z protokolu zkoušky nízkoteplotních vlastností.

Tab. 40: Hodnoty zkoušky nízkoteplotních vlastností pro SMA 11S s 50 % RAP SMA

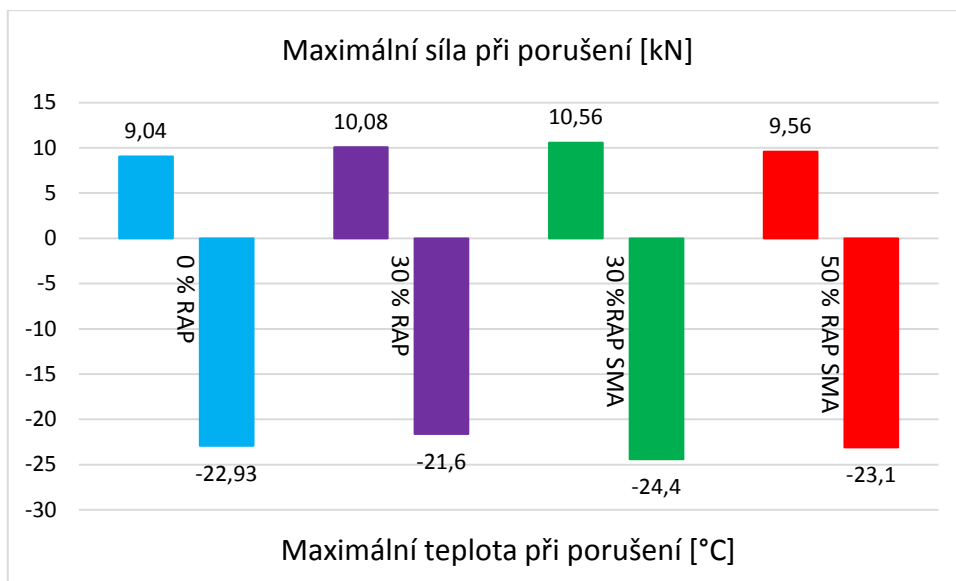
SMA 11S s 50 % RAP SMA	1.A.1_1	1.A.1_2	1.A.1_3	Průměr
Maximální síla při porušení [kN]	9,41	9,20	10,08	9,56
Max. napětí při porušení [MPa]	3,76	3,68	4,03	3,82
Teplota v komoře při porušení [°C]	-27,80	-26,70	-27,20	-27,23
Teplota vzorku při porušení [°C]	-23,70	-22,40	-23,20	-23,10

4.4.3.2 Porovnání naměřených hodnot

Výsledky zkoušek jsem i tentokrát porovnány se směsí SMA 11S bez použití R – materiálu, kterou ve své diplomové práci navrhla Ing. Markéta Malá [33] a také s výsledky ze směsi SMA 11S s 30 % RAP, kterou ve své bakalářské práci navrhl Vojtěch Motl [34].

Tab. 41: Porovnání hodnot zkoušek nízkoteplotních vlastností

SMA 11S	0 % RAP	30 % RAP	30 % RAP SMA	50 % RAP SMA
Maximální síla při porušení [kN]	9,04	10,08	10,56	9,56
Max. napětí při porušení [MPa]	3,62	4,03	4,22	3,82
Teplota v komoře při porušení [°C]	-27,30	-25,67	-28,20	-27,23
Teplota vzorku při porušení [°C]	-22,93	-21,60	-24,40	-23,10



Graf 16: Porovnání hodnot zkoušek nízkoteplotních vlastností

4.4.3.3 Vyhodnocení

Z výsledků je možné pozorovat, že výsledky pro jednotlivé směsi jsou téměř totožné. Můžeme tedy říct, že použití R – materiálu odolnost směsi proti nízkým teplotám nijak negativně neovlivňuje. Jednotlivé rozdíly budou pravděpodobně způsobeny rozdílným zastoupením nově přidávaného asfaltového pojiva a také kvalitou asfaltového pojiva v R – materiálu. Nejhorší průměrné výsledky směsi SMA 11S s 30 % RAP budou tedy způsobeny tím, že v R – materiálu byl použit nemodifikovaný silniční asfalt a pojivo nebylo dostatečně rejuvenováno (oživeno)

5 Závěr

Cílem práce bylo ověřit, zda je možné navrhnout asfaltovou směs typu SMA 11S pro obrusné vrstvy s využitím R – materiálu v zastoupení 30 % a 50 %. Pro návrh směsi byl použit R – materiál odfrézovaný pouze z obrusné vrstvy typu SMA (RAP SMA). Tento návrh byl porovnán s referenční směsí typu SMA 11S bez R – materiálu a se směsí typu SMA 11S s 30 % RAP (běžný R – materiál). Porovnáním se směsí bez R – materiálu se ověřovalo, zda je vůbec možné směsi typu SMA s větším množstvím R – materiálu navrhnout a jak se liší jejich vlastnosti ověřované zkouškami. Porovnání dvou směsí s 30 % R – materiálu si kladlo za cíl zjistit, jak odlišné vlastnosti budou tyto směsi mít při použití R – materiálu o různých kvalitách.

U zkoušky stanovení tvorby trvalých deformací bylo zjištěno, že s přidáváním vyššího množství R – materiálu klesá odolnost vůči tvorbě trvalých deformací. Všechny porovnávané směsi i přesto splnily požadavky normy ČSN EN 13108-5 s dostatečnou rezervou.

Při stanovení hodnot modulů tuhosti bylo zjištěno, že přidávání R – materiálu nemá zásadní vliv na hodnoty modulů tuhosti.

Při posuzování nízkoteplotních vlastností bylo zjištěno, že všechny směsi mají opět podobné vlastnosti a tudíž použití R – materiálu ve vyšším množství nemá negativní vliv na vlastnosti dané asfaltové směsí.

Těmito funkčními zkouškami bylo ověřeno, že je možné navrhovat směsi typu SMA s 30 % a 50 % R – materiálu, aniž by klesla jejich kvalita.

Největším problémem u navrhování asfaltových směsí s R – materiálem je jeho kvalita. V případě, že se R – materiál bude získávat frézování po vrstvách a tím se od sebe oddělí materiály s odlišnou kvalitou, je možné doporučit použití R – materiálu i do obrusných vrstev vozovek, což doposud není možné. Vliv kvality R – materiálu na vlastnosti směsi byl potvrzen funkčními zkouškami.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Školení technických norem a předpisů STEPS: STEPS 2 - Recyklace vozovek*. Sdružení pro výstavbu silnic Praha, 2010.
- [2] VARAUS, Michal. Recyklace asfaltových směsí na obalovně. In: *Konference Projektování pozemních komunikací* [online]. 2013 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://www.konference-projektovani.cz/rocnik-2013/prezentace/data/19-varaus.pdf>
- [3] VALENTIN, Jan. Recyklace asfaltových vozovek: Technologie, specifikace. In: *ReadGur* [online]. Praha: ČVUT, FSv, Katedra silničních staveb, 2012 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://readgur.com/doc/168845/recyklace-asfaltov%C3%BDch-vozovek---katedra-silni%C4%8Dn%C3%ADch-staveb>
- [4] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.
- [5] WIRTGEN: *Frézy za studena* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.wirtgen-group.com/cr/cs/products/wirtgen/>
- [6] TP 208. *Recyklace konstrukčních vrstev netuhých vozovek za studena*. Praha: Ministerstvo dopravy - OSI, 2009.
- [7] *ASB-portal.cz: Odborný stavební portál* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/rekonstrukce-vozovek-recyklace-za-studena>
- [8] TP 209. *Recyklace asfaltových vrstev netuhých vozovek na místě za horka*. Praha: Ministerstvo dopravy - OSI, 2009.
- [9] WIRTGEN GROUP: *Technologies, Cold recycling In-plant* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.wirtgen-group.com/en/technologies/road-rehabilitation/cold-recycling-plant/>
- [10] VARAUS, Michal. *Metodika aplikace R-materiálu v asfaltových směsích*. 2014.
- [11] AMMANN: *Obalovny asfaltových směsí* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: http://www.ammann-group.cz/fileadmin/ammann/syncfiles/International/images/ammann_asphalt_mixing-plant_brochure_cz.pdf

- [12] *ASTEC: Asphalt plants* [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <http://www.astecinc.com/products/asphalt-mixing-plants.html>
- [13] HÝŽL, Petr. *Praktické aplikace v pozemních komunikacích: Asfaltové směsi*. Brno, 2006.
- [14] ČSN 13108-5. *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 5: Asfaltový koberec mastixový*. Praha, 2008.
- [15] *Asphalt Additive. Storimpex* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.storimpex.de/index.php/de/de-produkte/asphalt-additive-de>
- [16] *CIUR a.s.: Silniční vlákna – S-CEL 7®* [online]. 2015 [cit. 2016-12-27]. Dostupné z: <http://www.ciur.cz/produkty/obsah/silnicni-vlakna-s-cel-7>
- [17] VARAUS, Michal. Přednáška BM02: Téma 5: Asfaltová pojiva. Brno, 2008.
- [18] ČSN EN 12697-28. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 28: Příprava vzorků pro stanovení obsahu pojiva, obsahu vody a zrnitosti*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [19] ČSN EN 12697-3. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení*. Praha: Český normalizační institut, 2013.
- [20] ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva: Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [21] ČSN EN 1426. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [22] ČSN EN 1427. *Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [23] ČSN EN 12697- 35. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 35: Laboratorní výroba směsi*. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [24] ČSN EN 12697-5. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2010.

- [25] ČSN EN 12697-30. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [26] ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [27] ČSN EN 12697-6. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [28] ČSN EN 12697- 8. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [29] ČSN EN 12697-22+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 22: Zkouška poježdění kolem*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [30] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 26: Tuhost*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [31] ČSN EN 12697-46. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [32] Asphalt in figures 2014. In: *European Asphalt Pavement Association* [online]. [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/AIF_2014_16022016.pdf
- [33] MALÁ, Markéta. *Využití R-materiálu v krytových vrstvách vozovek*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing.Petr Hýzl Ph.D.
- [34] MOTL, Vojtěch. *Problematika R - materiálu v asfaltových směsích typu SMA*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

- [35] TP 170. *Navrhování vozovek pozemních komunikací: Technické podmínky*. Ministerstvo dopravy, odbor silniční infrastruktury, 2010.
- [36] ČSN EN 13108-1. *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály: Část 1: Asfaltový beton*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

7 Seznam obrázků

Obr 1: Silniční fréza Wirtgen [5]	15
Obr 2: Schéma procesu recyklace za studena [7]	16
Obr 3: Míchací centrum, recyklace za studena [9]	17
Obr 4: Šaržová obalovna AMMANN [11]	18
Obr 5: Šaržová obalovna AMMANN s paralelním bubnem [11].....	19
Obr 6: Kontinuální obalovna ASTEC [12]	20
Obr 7: Skládka R - materiálu v Německu [10]	20
Obr 8: Struktura směsi SMA [13].....	21
Obr 9: Frakce 0/2 mm	23
Obr 10: Frakce 2/5 mm	23
Obr 11: Frakce 4/8 mm	23
Obr 12: Frakce 8/11 mm	23
Obr 13: Vápencová moučka	24
Obr 14: R - materiál	25
Obr 15: Celulózová vlákna S-CEL 7 [16]	26
Obr 16: Colflex 45/80 - 55.....	27
Obr 17: Homogenizace	29
Obr 18: Kvartace.....	29
Obr 19: Dělič vzorků	29
Obr 20: Zařízení pro extrakci asfaltového pojiva	30
Obr 21: Vakuové destilační zařízení.....	31
Obr 22: Prosévací zařízení.....	33
Obr 23: Penetrometr.....	33
Obr 24: Zařízení na měření bodu měknutí.....	35
Obr 25: Předpřipravené vzorky.....	35
Obr 26: Uzavřené míchací zařízení	37
Obr 27: Lopatky míchacího zařízení	37
Obr 28: Rozdělený vzorek asfaltové směsi.....	39
Obr 29: Prázdný pyknometr.....	40
Obr 30: Pyknometr se vzorkem	40
Obr 31: Vzorek zalitý od vzdušněnou vodou	40
Obr 32: Vakuové zařízení	41

Obr 33: Rozměry zkušební tělesa	42
Obr 34: Schéma rázového zhutňovače.....	42
Obr 35: Rázový zhutňovač	42
Obr 36: Marshallovo těleso.....	43
Obr 37: Marshallovo těleso.....	43
Obr 38: Lamelový zhutňovač	44
Obr 39: Segmentový zhutňovač.....	44
Obr 40: Měření teploty na povrchu směsi	45
Obr 41: Proces hutnění směsi	45
Obr 42: Vložený rám se zkušební deskou	48
Obr 43: Zkušební kolo s vloženým zatížením	48
Obr 44: Proces měření	48
Obr 45: Schéma zkušební komolého klínu [30]	49
Obr 46: Zkušební zařízení na měření modulů tuhosti.....	49
Obr 47: Kotoučová pila.....	50
Obr 48: Teoretické rozměry komolého klínu [33].....	50
Obr 49: Uchycení tělesa ve zkušebním zařízení.....	51
Obr 50: Připravená zkušební tělesa	51
Obr 51: Připravená zkušební tělesa	53
Obr 52: Teoretické rozměry zkušební tělesa [33].....	53
Obr 53: Uchycený zkušební vzorek.....	54
Obr 54: Porušený zkušební vzorek	54
Obr 55: Zkušební desky po zkoušce trvalých deformací.....	67
Obr 56: Zařízení na měření modulů tuhosti.....	73
Obr 57: Zařízení na měření nízkoteplotních vlastností.....	79

8 Seznam tabulek

Tab. 1: Nejvyšší přípustný obsah R – materiálu v % asfaltové směsi typu asfaltový beton [36].....	12
Tab. 2: Využití R - materiálu do asfaltových směsí za horka. [32]	13
Tab. 3: Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [g], [33]	24
Tab. 4: Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [%], [33].....	24
Tab. 5: Sítový rozbor R – materiálu [34].....	25
Tab. 6: Vlastnosti vyextrahovaného asfaltového pojiva [34]	25
Tab. 7: Extrakce pojiva z R - materiálu	55
Tab. 8: Sítový rozbor	56
Tab. 9: Vlastnosti vyextrahovaného asfaltového pojiva.....	57
Tab. 10: Vlastnosti nově přidávaného asfaltového pojiva COLFLEX 45/80 - 55	57
Tab. 11: Procentuální zastoupení jednotlivých složek.....	58
Tab. 12: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 1, v %	59
Tab. 13: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 1	59
Tab. 14: Obejmová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 1	59
Tab. 15: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 2, v %	60
Tab. 16: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 2.....	60
Tab. 17: Objemová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 2.....	61
Tab. 18: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 3, v %	61
Tab. 19: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 3.....	62
Tab. 20: Objemová hmotnost a mezerovitost pro návrh č. 3.....	62
Tab. 21: Procentuální zastoupení jednotlivých složek.....	63
Tab. 22: Zastoupení jednotlivých frakcí kameniva pro návrh č. 1, v %	63
Tab. 23: Maximální objemová hmotnost pro návrh č. 1	64
Tab. 24: Objemová hmotnost pro návrh č. 1	64
Tab. 25: Vlastnosti zkušebních desek s 30 % RAP SMA	65
Tab. 26: Vlastnosti zkušebních desek s 50 % RAP SMA	66
Tab. 27: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 50 °C	68
Tab. 28: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 60 °C	68
Tab. 29: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 50 °C	69
Tab. 30: Průměrné hodnoty získané po zkoušce trvalých deformací, T = 60 °C	70
Tab. 31: Porovnání výsledků při teplotě T = 50 °C	71

Tab. 32: Porovnání výsledků při teplotě $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	72
Tab. 33: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	73
Tab. 34: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	74
Tab. 35: Hodnoty modulů tuhosti pro teplotu $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	75
Tab. 36: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$	76
Tab. 37: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	76
Tab. 38: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	77
Tab. 39: Hodnoty zkoušky nízkoteplotních vlastností pro SMA 11S s 30 % RAP SMA	79
Tab. 40: Hodnoty zkoušky nízkoteplotních vlastností pro SMA 11S s 50 % RAP SMA	80
Tab. 41: Porovnání hodnot zkoušek nízkoteplotních vlastností	80

9 Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti R – materiálů	57
Graf 2: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 30 % RAP SMA, T = 50 °C .	68
Graf 3: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 30 % RAP SMA, T = 60 °C .	69
Graf 4: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 50 % RAP SMA, T = 50 °C .	69
Graf 5: Průměrná hloubka trvalé deformace SMA 11S s 50 % RAP SMA, T = 60 °C .	70
Graf 6: Porovnání PRD_{AIR} pro T = 50 °C	71
Graf 7: Porovnání WTS_{AIR} pro T = 50 °C	71
Graf 8: Porovnání PRD_{AIR} pro T = 60 °C	72
Graf 9: Porovnání WTS_{AIR} pro T = 60 °C	72
Graf 10: Moduly tuhosti při T = 15 °C	74
Graf 11: Moduly tuhosti při T = -5 °C	74
Graf 12: Modul tuhosti při T = 40 °C	75
Graf 13: Porovnání modulů tuhosti pro zkušební teplotu T = 15 °C	76
Graf 14: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě T = -5 °C	77
Graf 15: Porovnání modulů tuhosti při zkušební teplotě T = 40 °C	77
Graf 16: Porovnání hodnot zkoušek nízkoteplotních vlastností	81

10 Seznam rovnic

Rovnice 1: Výpočet hmotnosti extrahovaného pojiva:.....	31
Rovnice 2: Výpočet maximální objemové hmotnosti - volumetrický postup	41
Rovnice 3: Výpočet objemové hmotnosti.....	46
Rovnice 4: Výpočet mezerovitosti.....	46
Rovnice 5: Výpočet poměrné hloubky vyjeté koleje.....	48
Rovnice 6: Výpočet přírůstku hloubky vyjeté koleje	49
Rovnice 7: Reálná složka modulu tuhosti E_1	51
Rovnice 8: Imaginární složka modulu tuhosti E_1	51
Rovnice 9: Výpočet modulu tuhosti E	52

11 Seznam použitých zkratek a symbolů

Φ	Průměr
ρ	Hustota
V	Objem
°C	Stupně Celsia
ČR	Česká republika
g	Gram
Hz	Hertz
kPa	Kilopascal
mm	Milimetr
MPa	Megapascal
p. j.	Penetrační jednotka
PRD _{AIR}	Poměrná hloubka vyjeté koleje
WTS _{AIR}	Přírůstek hloubky poměrné koleje
SMA	Asfaltový koberec
AC	Asfaltový beton
ACO	Asfaltový beton pro obrusné vrstvy
ACL	Asfaltový beton pro ložní vrstvy
ACP	Asfaltový beton pro podkladní vrstvy
RAP	Reclaimed asphalt pavement (R – materiál)
RAP SMA	R – materiál z vrstvy asfaltové směsi typu asfaltový koberec mastixový
R – materiál	Stará, rozpojená asfaltová směs, která se získává frézováním, nebo vybouráním z konstrukce vozovky

12 Seznam příloh

Příloha 1: Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi, objemové hmotnosti zkušebních těles a mezerovitosti

Příloha 2: Rozměry, objemová hmotnost a mezerovitost zkušebních desek

Příloha 3: Odolnost proti tvorbě trvalých deformací

Příloha 4: Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

Příloha 5: Měření modulů tuhosti

Příloha 6: Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi

Příloha 1: Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi, objemové hmotnosti zkušebních těles a mezerovitosti

Druh asfaltové směsi: **SMA 11S + 30 % RAP SMA, návrh č. 1**

Zkoušeno: 30.8.2016

Označení vzorku		I.
Množství pojiva	[%]	6,5
Označení pyknometru		IV.
Pyknometr prázdný	[g]	690,7
Pyknometr + vzorek	[g]	1628,1
Pyknometr + vzorek + rozpouštědlo	[g]	3170,3
Objem pyknometru V_p	[m ³]	1322,7
Hustota rozpouštědla ρ_w	[kg/m ³]	1614
Teplota temperace	[°C]	25
Navážka asf.směsi	[g]	937,4
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	[kg/m ³]	2 551

Teplota hutnění	[°C]	165
Počet úderů	-	2 x 50

Zkušební těleso označení		1	2	3	Průměr
Hmotnost, suchá	[g]	1304,7	1285,8	1298,4	1298,4
Hmotnost, pod vodou	[g]	789,0	777,0	784,4	784,4
Hmotnost, vlhká	[g]	1305,5	1286,2	1298,7	1298,7
Objemová hmotnost ρ_{bssd}	[kg/m ³]	2520,3	2519,4	2518,8	2519,5
Mezerovitost	[%]	1,2	1,2	1,3	1,2

Druh asfaltové směsi: **SMA 11S + 30 % RAP SMA, návrh č. 2**

Zkoušeno: 15.9.2016

Označení vzorku		II.
Množství pojiva	[%]	6,5
Označení pyknometru		II.
Pyknometr prázdný	[g]	694,7
Pyknometr + vzorek	[g]	1828,0
Pyknometr + vzorek + rozpouštědlo	[g]	3250,3
Objem pyknometru V_p	[m ³]	1314,913
Hustota rozpouštědla ρ_w	[kg/m ³]	1614
Teplota temperace	[°C]	25
Navážka asf.směsi	[g]	1133,3
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	[kg/m ³]	2 612

Teplota hutnění	[°C]	165
Počet úderů	-	2 x 50

Zkušební těleso označení		4	5	6	Průměr
Hmotnost, suchá	[g]	1295,6	1292,2	1313,6	1300,5
Hmotnost, pod vodou	[g]	777,5	768,7	786,3	777,5
Hmotnost, vlhká	[g]	1297,7	1294,5	1316,3	1302,8
Objemová hmotnost ρ_{bssd}	[kg/m ³]	2484,6	2451,7	2472,5	2469,6
Mezerovitost	[%]	4,9	6,1	5,3	5,4

Druh asfaltové směsi: **SMA 11S + 30 % RAP SMA návrh č. 3**

Zkoušeno: 15.9.2016

Označení vzorku		III.
Množství pojiva	[%]	6,5
Označení pyknometru		VIII.
Pyknometr prázdný	[g]	380,7
Pyknometr + vzorek	[g]	913,7
Pyknometr + vzorek + voda	[g]	1363,6
Objem pyknometru V_p	[m ³]	657,7
Hustota vody ρ_w	[kg/m ³]	997,1
Teplota temperace	[°C]	25
Navážka asf.směsi	[g]	533,0
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	[kg/m ³]	2 567

Teplota hutnění	[°C]	165
Počet úderů	-	2 x 50

Zkušební těleso označení		4.1	4.2	4.4	Průměr
Hmotnost, suchá	[g]	1078,1	1191,5	1190,0	1190,0
Hmotnost, pod vodou	[g]	648,5	714,7	705,6	705,6
Hmotnost, vlhká	[g]	1078,3	1192,6	1194,1	1194,1
Objemová hmotnost ρ_{bssd}	[kg/m ³]	2503,3	2488,2	2430,6	2475,0
Mezerovitost	[%]	2,5	3,1	5,3	3,6

Druh asfaltové směsi: **SMA 11S + 50 % RAP SMA návrh č. 1**

Zkoušeno: 23.11.2016

Označení vzorku		I.
Množství pojiva	[%]	6,5
Označení pyknometru		I.
Pyknometr prázdný	[g]	384,4
Pyknometr + vzorek	[g]	815,5
Pyknometr + vzorek + voda	[g]	1302,2
Objem pyknometru V_p	[m ³]	653,9
Hustota vody ρ_w	[kg/m ³]	997
Teplota temperace	[°C]	25
Navážka asf.směsi	[g]	431,1
Maximální objemová hmotnost ρ_{mv}	[kg/m ³]	2579

Teplota hutnění	[°C]	165
Počet úderů	-	2 x 50

Zkušební těleso označení		1	2	3	Průměr
Hmotnost, suchá	[g]	1236,4	1230,2	1237,3	1234,6
Hmotnost, pod vodou	[g]	746,0	739,4	740,3	741,9
Hmotnost, vlhká	[g]	1241,0	1234,0	1242,8	1239,3
Objemová hmotnost ρ_{bssd}	[kg/m ³]	2491,6	2483,8	2497,1	2490,8
Mezerovitost	[%]	3,4	3,7	3,4	3,5

Příloha 2: Rozměry, objemová hmotnost a mezerovitost zkušebních desek

Zkušební desky z asfaltové směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA

	[%]	4.A.1	4.A.2	4.A.3	4.A.4	4.A.5
Hm. suchá	[g]	8009	10322	10253	10392	10297
Hm. pod vodou	[g]	4772	6168	6145	6223	6189
Hm. osušená	[g]	8035	10368	10289	10412	10319
Tloušťka	[mm]	42,45	51,06	51,63	51,28	49,92
		43,70	53,65	51,10	50,90	50,38
		43,44	52,25	50,96	52,09	50,14
		42,74	52,06	50,89	50,95	51,05
		42,31	52,57	50,60	51,35	49,59
		42,36	53,20	51,65	50,72	51,26
		41,02	52,90	52,07	52,19	51,50
		41,82	53,14	51,50	51,73	51,30
		41,50	51,66	50,78	50,90	50,30
		41,81	52,30	51,90	51,58	50,70
Šířka	[mm]	262,00	261,10	260,40	260,50	260,60
		261,00	261,00	260,50	260,70	261,00
		260,50	261,00	260,30	260,80	261,00
Délka	[mm]	323,00	322,20	321,50	321,70	322,40
		323,30	322,30	321,30	321,70	311,90
Tloušťka průměr	[mm]	42,32	52,48	51,31	51,37	50,61
Šířka průměr	[mm]	261,17	261,03	260,40	260,67	260,87
Délka průměr	[mm]	323,15	322,25	321,40	321,70	317,15
Objemová hmotnost	[kg/m ³]	2 450,1	2 453,2	2 468,5	2 475,7	2 487,5
Maximální objem. hmotnost	[kg/m ³]	2567,2	2567,2	2567,2	2567,2	2567,2
Mezerovitost	[%]	4,5	4,4	3,8	3,6	3,1
Míra zhutnění	[%]	99,0%	99,1%	99,7%	100,0%	100,5%
Zkouška		pojezd kolem	pojezd kolem	modul tuhosti	cyklon	modul tuhosti

Zkušební desky z asfaltové směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA

	[%]	1.A.1	1.A.2	1.A.5	1.A.3	1.A.4
Hm. suchá	[g]	10 385	10 287	10 284	8 391	8 294
Hm. pod vodou	[g]	6 255	6 205	6 205	5 058	5 018
Hm. osušená	[g]	10 413	10 300	10 308	8 408	8 313
Tloušťka	[mm]	51,11	51,00	50,56	41,17	39,97
		51,05	51,15	50,86	40,30	40,28
		51,63	50,50	50,54	40,10	40,79
		50,71	49,64	49,59	41,44	40,66
		50,85	50,34	49,84	40,67	39,53
		50,59	50,50	49,96	41,63	41,33
		51,52	49,92	50,36	41,47	41,29
		51,38	49,65	50,11	41,34	41,15
		50,78	50,28	50,34	40,56	40,37
		51,27	49,60	49,68	41,57	40,87
Šířka	[mm]	260,40	260,50	261,00	261,00	260,60
		260,70	260,90	261,20	261,20	260,90
		260,70	260,70	260,70	261,00	260,80
Délka	[mm]	321,80	320,20	322,30	322,00	321,60
		322,50	320,20	322,10	321,80	321,90
Tloušťka průměr	[mm]	51,09	50,26	50,18	41,03	40,62
Šířka průměr	[mm]	260,60	260,70	260,97	261,07	260,77
Délka průměr	[mm]	322,15	320,20	322,20	321,90	321,75
Objemová hmotnost	[kg/m³]	2 492,8	2 506,3	2 500,7	2 499,7	2 511,4
Maximální objem. hmotnost	[kg/m³]	2579,00	2579,00	2579,00	2579,00	2579,00
Mezerovitost	[%]	3,3	2,8	3,0	3,1	2,6
Míra zhutnění	[%]	100,1	100,6	100,4	100,4	100,8
Zkouška		cyklon	modul tuhosti	modul tuhosti	pojezd kolem	pojezd kolem

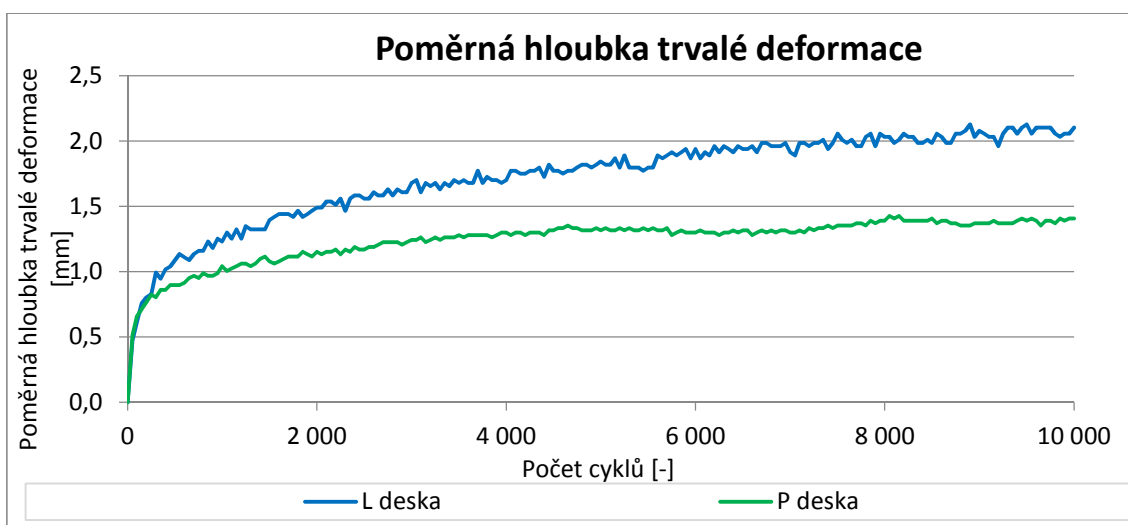
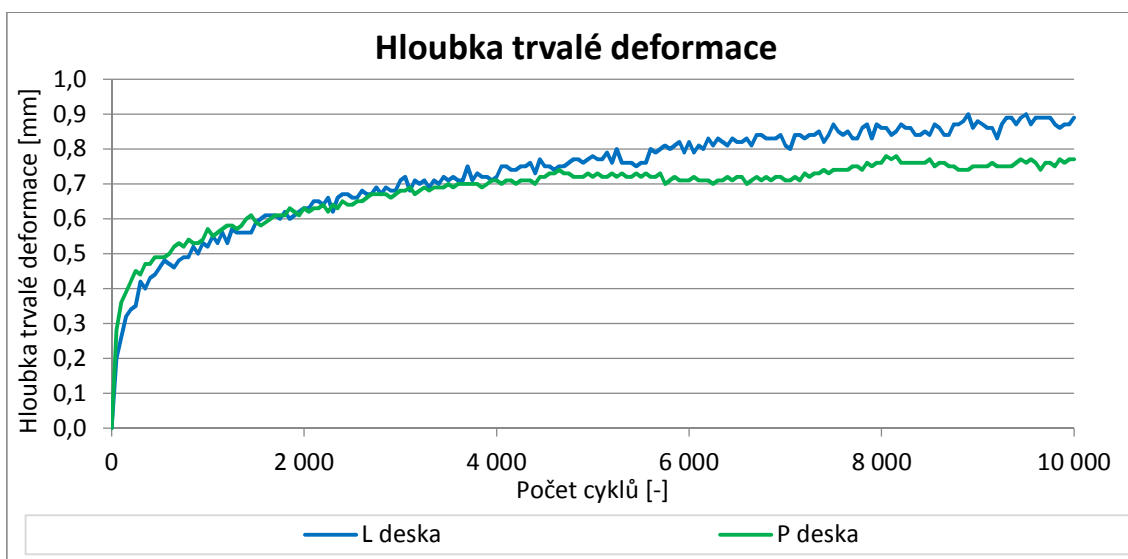
Příloha 3: Odolnost proti tvorbě trvalých deformací

Zkouška poježdění kolem asfaltové směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA

Zkušební teplota: $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Datum poježdění: 24. 11. 2016

Označení	Deska	tloušťka	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
4.A.1	L	42,3	0,78	1,8	0,022
4.A.5	P	54,7	0,72	1,3	0,01

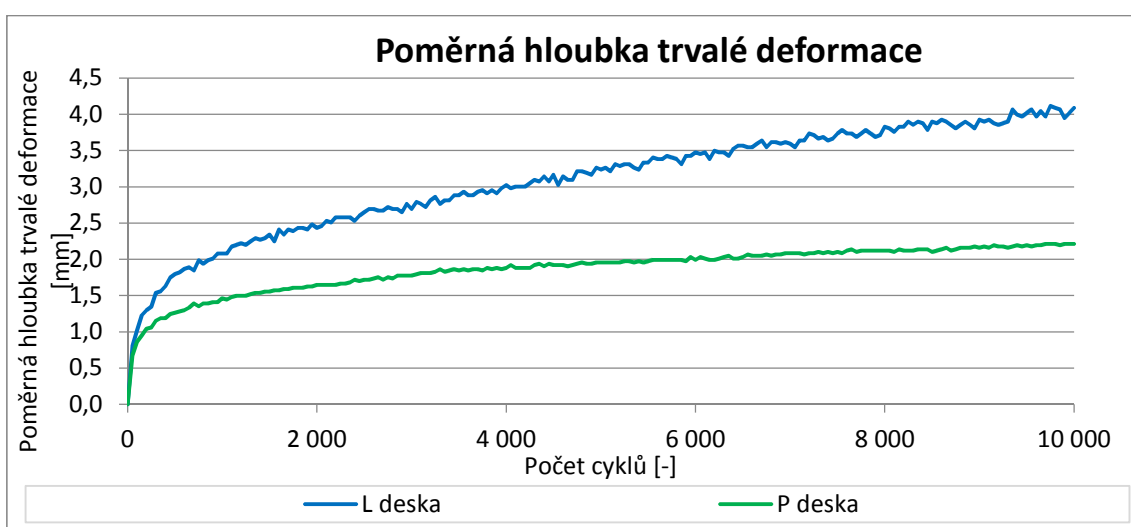
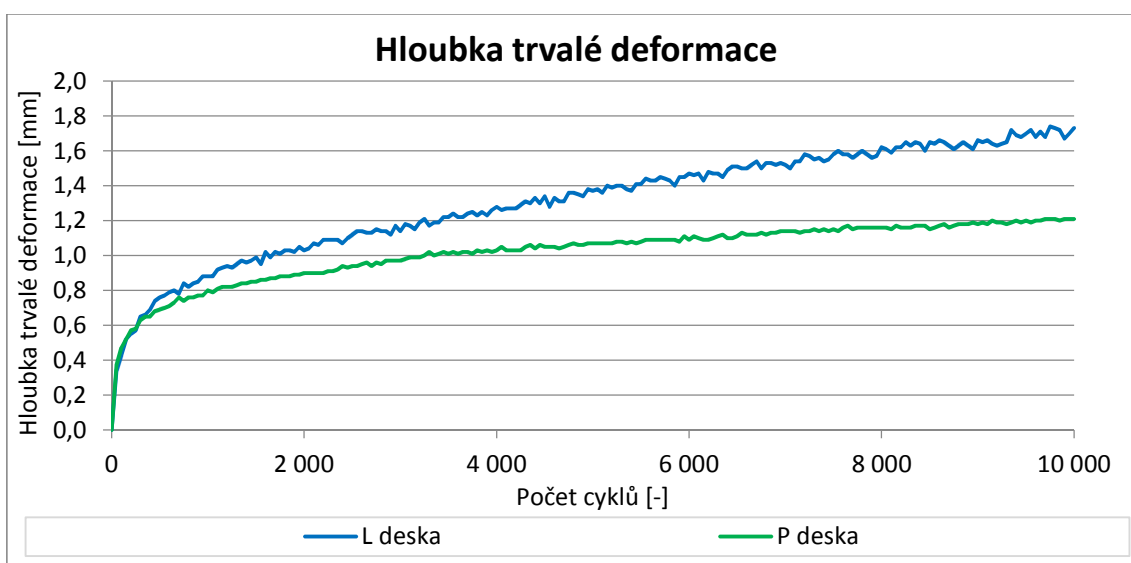


Zkouška pojíždění kolem asfaltové směsi SMA 11S s 30 % RAP SMA

Zkušební teplota: $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Datum pojíždění: 25. 11. 2016

Označení	Deska	tloušťka	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/10 ³ cyklů]
4.A.1	L	42,3	1,37	3,2	0,072
4.A.5	P	54,7	1,07	2,0	0,028

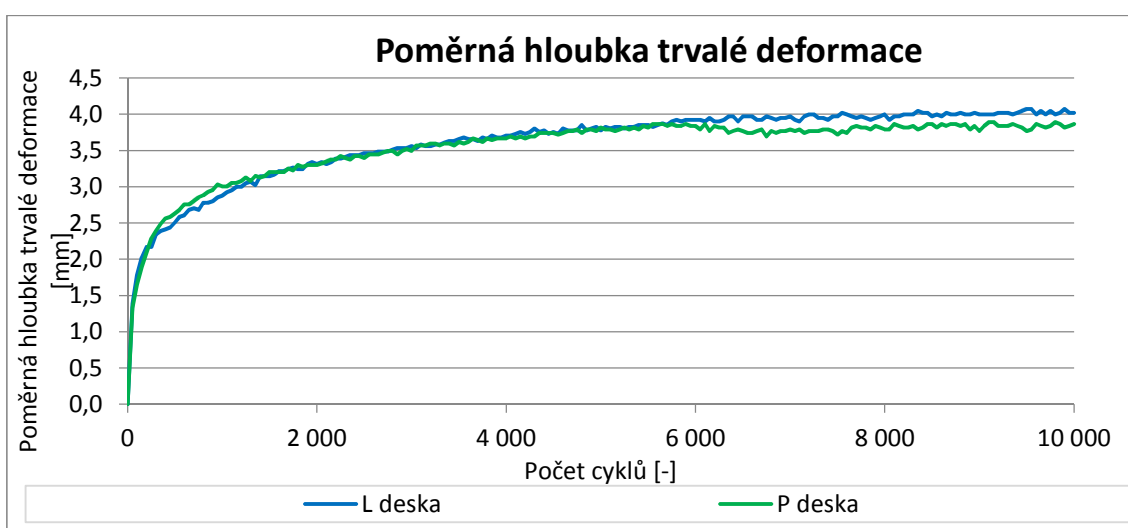
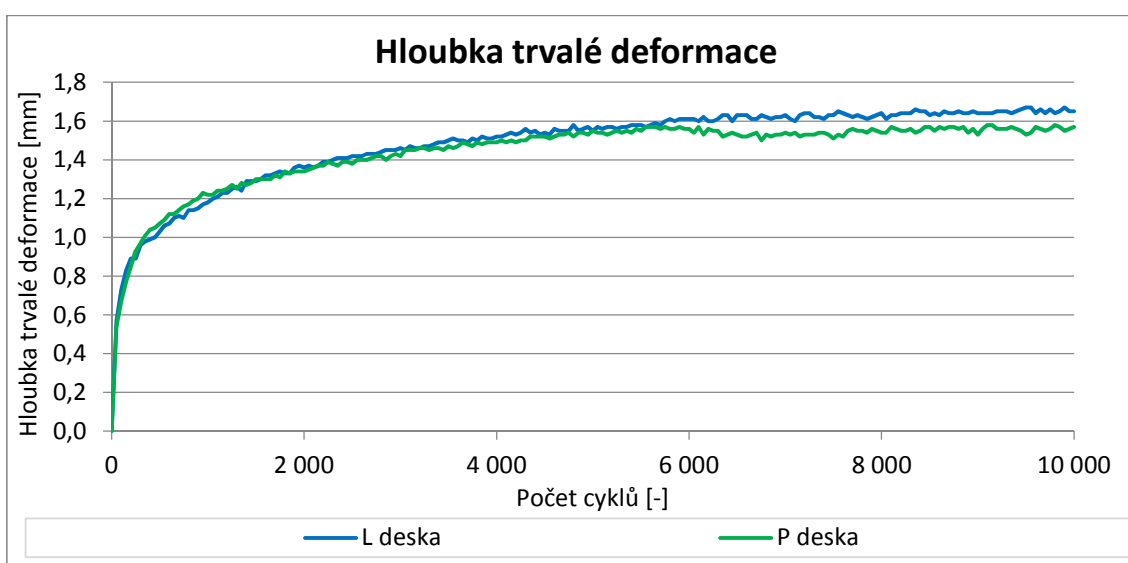


Zkouška pojíždění kolem asfaltové směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA

Zkušební teplota: $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Datum pojíždění: 12. 12. 2016

Označení	Deska	tloušťka	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/ 10^3 cyklů]
1.A.3	L	41,0	1,55	3,8	0,02
1.A.4	P	40,6	1,55	3,8	0,004

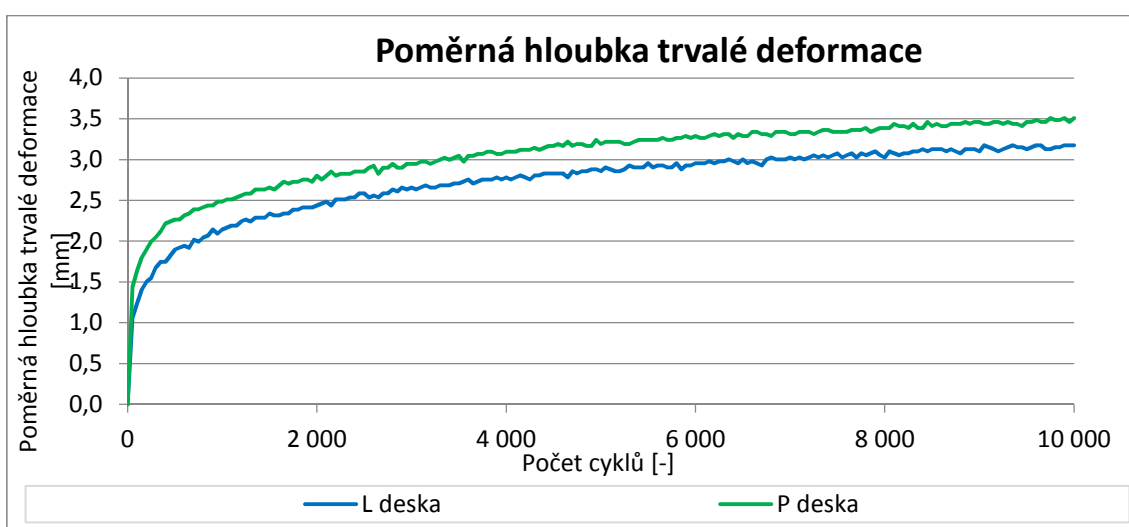
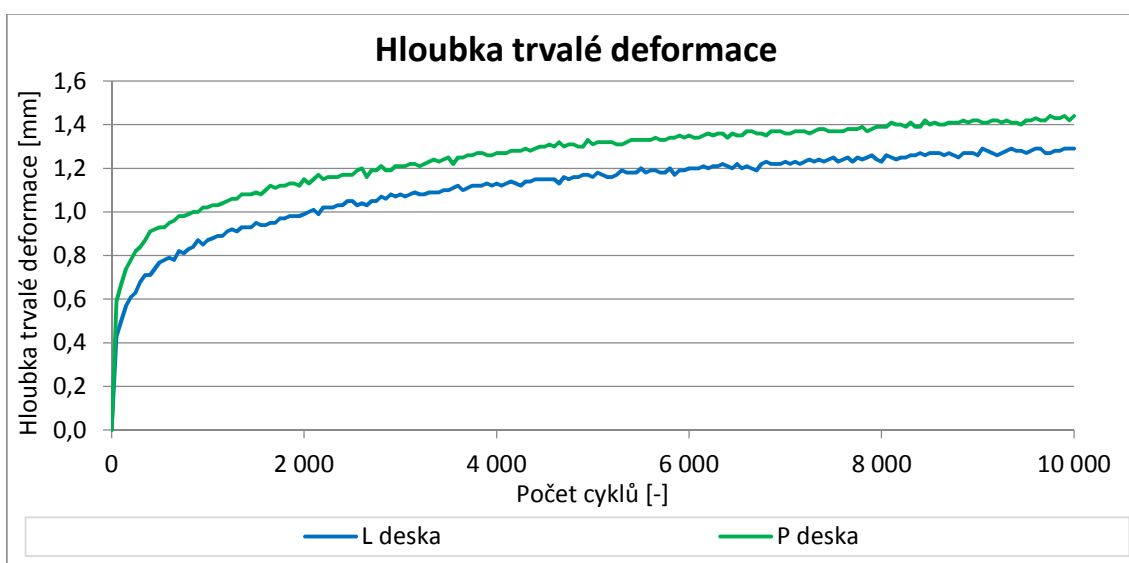


Zkouška pojíždění kolem asfaltové směsi SMA 11S s 50 % RAP SMA

Zkušební teplota: $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Datum pojíždění: 13. 12. 2016

Označení	Deska	tloušťka	$Y_{S,10}$	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
		[mm]	[mm]	[%]	[mm/ 10^3 cyklů]
1.A.4	L	40,6	1,16	2,9	0,026
1.A.3	P	41,0	1,31	3,2	0,026



Příloha 4: Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

SMA 11S s 30 % RAP SMA					
	h₁	h₂	c	L	m
4.A.3_1	72,12	27,80	51,44	250,0	1550,2
4.A.3_2	71,75	24,33	51,59	250,0	1486,5
4.A.3_3	71,42	26,72	51,56	249,7	1536,2
4.A.3_4	72,23	26,32	51,93	249,9	1531,0
4.A.3_5	70,40	27,60	51,83	249,7	1526,3
4.A.5_1	71,94	27,93	51,04	250,7	1559,4
4.A.5_2	70,67	25,71	51,10	250,5	1516,3
4.A.5_3	70,48	25,88	51,45	250,5	1500,0
4.A.5_4	71,31	28,20	51,61	250,9	1563,6
4.A.5_5	71,33	27,85	51,21	250,3	1545,5
SMA 11S s 50 % RAP SMA					
1.A.2_1	71,25	25,88	50,56	250,9	1515,3
1.A.2_2	71,67	25,13	50,43	251,0	1508,9
1.A.2_3	71,83	26,76	50,67	251,3	1541,6
1.A.2_4	71,82	25,28	50,92	251,1	1521,0
1.A.2_5	71,78	26,63	50,85	251,4	1539,3
1.A.5_1	71,80	25,36	50,69	251,0	1510,0
1.A.5_2	71,79	26,88	50,72	250,4	1543,1
1.A.5_3	71,32	27,59	51,01	250,7	1547,7
1.A.5_4	71,30	26,47	50,82	250,6	1526,6
1.A.5_5	71,62	27,62	50,80	250,2	1525,7

Příloha 5: Měření modulů tuhosti

Zkušební směs: **SMA 11S s 30 % RAP SMA**

Datum měření: 14. 12. 2016

Zkušební teplota: **T = 40 °C**

Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.A.3_1	909	1182	1436	1597	1925
4.A.3_2	873	1240	1471	1781	2096
4.A.3_3	616	1187	1467	1814	2130
4.A.3_4	914	1111	1347	1599	1904
4.A.3_5	945	1197	1390	1658	2008
4.A.5_1	822	1136	1407	1660	1938
4.A.5_2	986	1310	1537	1765	2091
4.A.5_3	896	1226	1385	1745	2097
4.A.5_4	914	1217	1405	1792	2205
4.A.5_5	831	1101	1331	1647	2005

Zkušební teplota: $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.A.3_1	6016	6587	6931	7248	8261
4.A.3_2	6057	6534	6951	7229	7538
4.A.3_3	6165	6756	7153	7472	7767
4.A.3_4	6295	6857	7206	7553	7805
4.A.3_5	6138	6752	7089	7298	7942
4.A.5_1	5904	6453	6889	7178	7949
4.A.5_2	6442	7053	7552	7903	8287
4.A.5_3	5770	6383	6830	7068	7573
4.A.5_4	6046	6775	7185	7482	7816
4.A.5_5	5925	6676	7046	7384	7738

Zkušební teplota: $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
4.A.3_1	11465	11879	12217	12421	12947
4.A.3_2	12255	12604	12926	13278	13481
4.A.3_3	6951	7150	7278	7330	7348
4.A.3_4	10537	10966	11222	11447	11524
4.A.3_5	12002	12475	12785	12882	13083
4.A.5_1	11876	12279	12576	12763	12936
4.A.5_2	12656	12977	13206	13364	14123
4.A.5_3	11219	11531	11576	11781	12336
4.A.5_4	11994	12451	12683	12951	13005
4.A.5_5	12410	12833	13246	13461	13560

Zkušební směs: **SMA 11S s 50 % RAP SMA**

Datum měření: 15. 12. 2016

Zkušební teplota: **T = 40 °C**

Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
1.A.2_1	957	1248	1484	1854	2306
1.A.2_2	993	1342	1559	1898	2211
1.A.2_3	1056	1354	1559	1988	2351
1.A.2_4	1037	1337	1567	1857	2356
1.A.2_5	988	1301	1421	1958	2026
1.A.5_1	964	1297	1506	1849	2133
1.A.5_2	1323	1617	1849	2193	2623
1.A.5_3	1416	1751	2020	2383	2818
1.A.5_4	1142	1446	1628	1957	2135
1.A.5_5	918	1169	1407	1635	1188

Zkušební teplota: $T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
1.A.2_1	6128	6890	7345	7710	7960
1.A.2_2	6633	7139	7592	7969	8538
1.A.2_3	6808	7560	8093	8399	8904
1.A.2_4	6984	7739	8128	8530	9187
1.A.2_5	6589	7196	7535	7949	8251
1.A.5_1	6636	7275	7716	8067	8361
1.A.5_2	6855	7443	7920	8211	8636
1.A.5_3	6660	7394	7918	8225	8611
1.A.5_4	6754	7303	7724	8079	8399
1.A.5_5	6304	6838	7211	7574	7798

Zkušební teplota $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

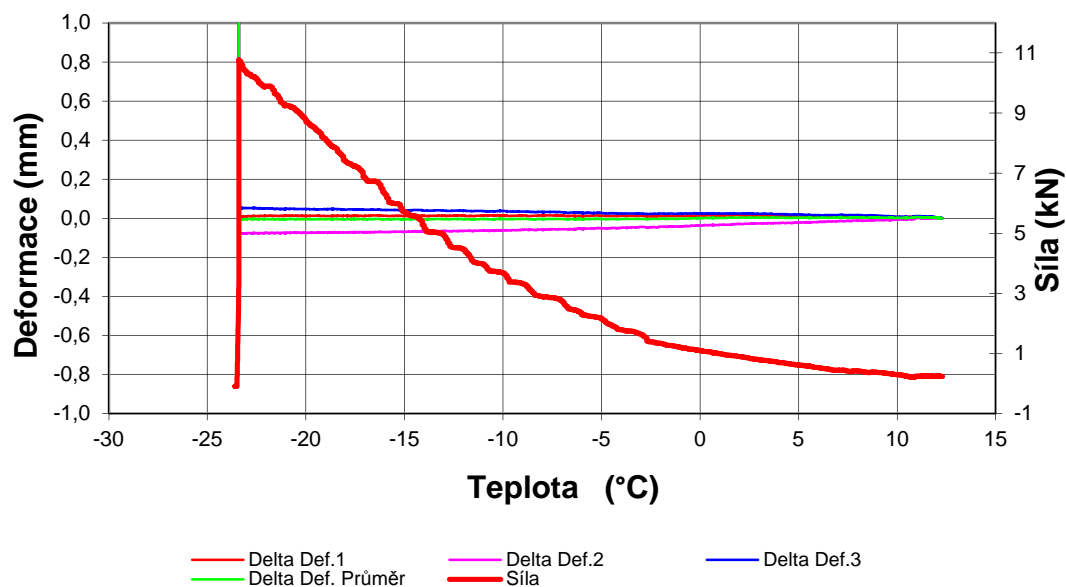
Tělesa	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
1.A.2_1	12953	13385	13692	13910	14057
1.A.2_2	12580	13064	13364	13559	13719
1.A.2_3	13751	14373	14703	14993	15089
1.A.2_4	13079	13505	13853	14135	14504
1.A.2_5	12128	12645	12993	13185	13500
1.A.5_1	12205	12807	13103	13302	13574
1.A.5_2	12736	13243	13605	13837	13955
1.A.5_3	11919	12278	12665	12746	12965
1.A.5_4	12541	12924	13455	13470	13565
1.A.5_5	11811	12240	12586	12880	12897

Příloha 6: Stanovení nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi

Zkušební směs: **SMA 11S s 30 % RAP SMA**

Datum měření: 12. 12. 2016

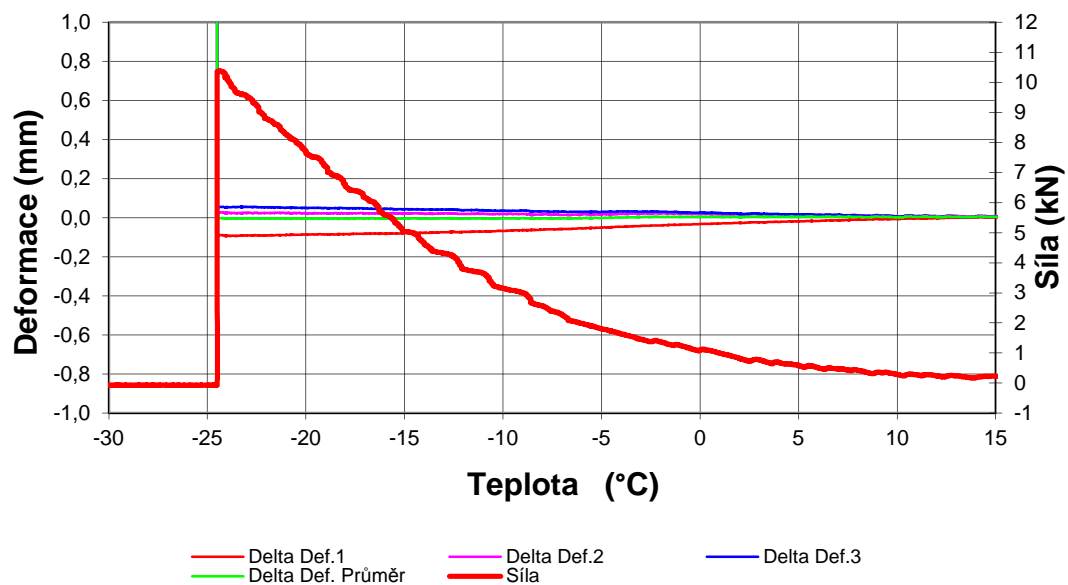
Akce	SMA 11S s 30 % RAP SMA	
Asfaltová směs	4.A.4_1	
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200	
Datum zkoušky	12. 12. 2016	
Zkoušku provedl	Michal Slaviček	
Rychlost temperování [°C/hod]	10	
Maximální síla při porušení [kN]	10,78	
Max. napětí při porušení [MPa]	4,31	
Teplota v komoře při porušení [°C]	-26,9	
Teplota vzorku při porušení [°C]	-23,4	



Zkušební směs: **SMA 11S s 30 % RAP SMA**

Datum měření: 13. 12. 2016

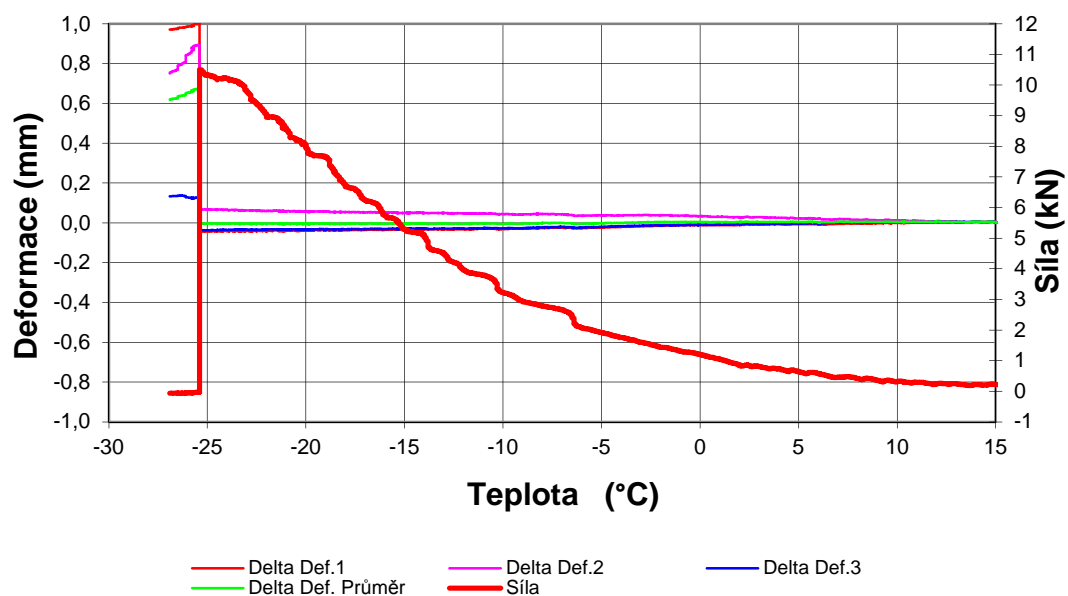
Akce	SMA 11S s 30 % RAP SMA
Asfaltová směs	4.A.4_2
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	13. 12. 2016
Zkoušku provedl	Michal Slaviček
Rychlost temperování [°C/hod]	10
Maximální síla při porušení [kN]	10,40
Max. napětí při porušení [MPa]	4,16
Teplota v komoře při porušení [°C]	-28,4
Teplota vzorku při porušení [°C]	-24,4



Zkušební směs: **SMA 11S s 30 % RAP SMA**

Datum měření: 15. 12. 2016

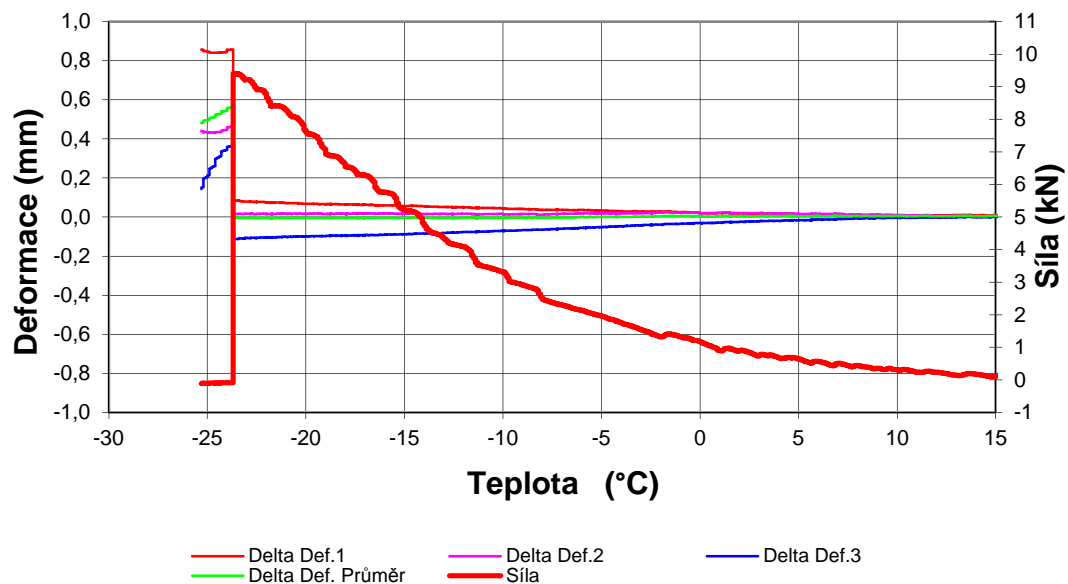
Akce	SMA 11S s 30 % RAP SMA
Asfaltová směs	4.A.4_3
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	15. 12. 2016
Zkoušku provedl	Michal Slaviček
Rychlost temperování [°C/hod]	10
Maximální síla při porušení [kN]	10,50
Max. napětí při porušení [MPa]	4,20
Teplota v komoře při porušení [°C]	-29,3
Teplota vzorku při porušení [°C]	-25,4



Zkušební směs: **SMA 11S s 50 % RAP SMA**

Datum měření: 16. 12. 2016

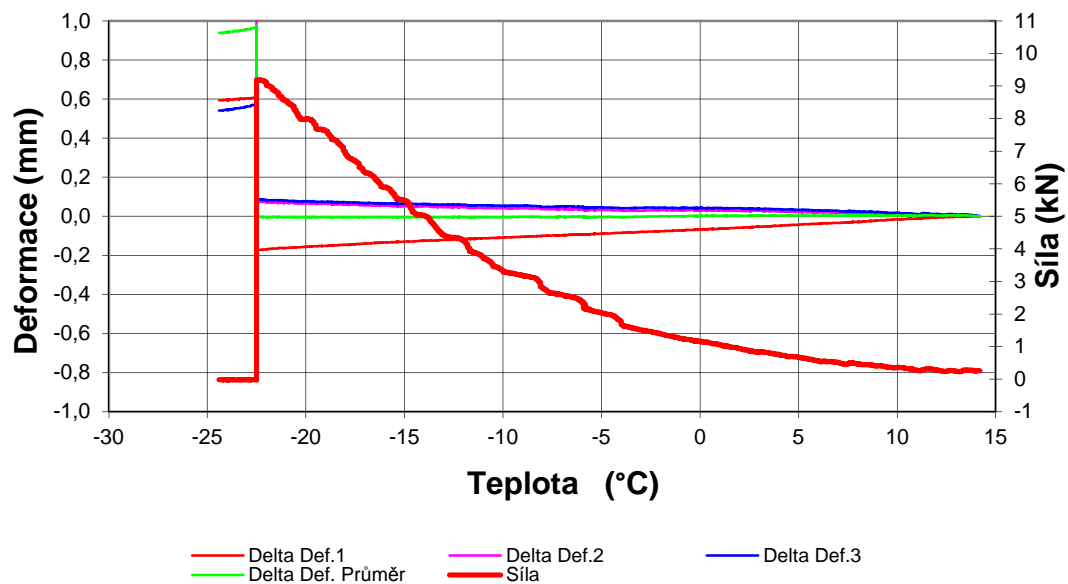
Akce	SMA 11S s 50 % RAP SMA	
Asfaltová směs	1.A.1_1	
Rozměry zkušebního tělesa	[mm]	50 x 50 x 200
Datum zkoušky	16. 12. 2016	
Zkoušku provedl	Michal Slaviček	
Rychlost temperování	[°C/hod]	10
Maximální síla při porušení	[kN]	9,41
Max. napětí při porušení	[MPa]	3,76
Teplota v komoře při porušení	[°C]	-27,8
Teplota vzorku při porušení	[°C]	-23,7



Zkušební směs: **SMA 11S s 50 % RAP SMA**

Datum měření: 4. 1. 2017

Akce	SMA 11S s 50 % RAP SMA	
Asfaltová směs	1.A.1_2	
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200	
Datum zkoušky	4. 1. 2017	
Zkoušku provedl	Michal Slaviček	
Rychlost temperování [°C/hod]	10	
Maximální síla při porušení [kN]	9,20	
Max. napětí při porušení [MPa]	3,68	
Teplota v komoře při porušení [°C]	-26,7	
Teplota vzorku při porušení [°C]	-22,4	



Zkušební směs: **SMA 11S s 50 % RAP SMA**

Datum měření: 5. 1. 2017

Akce	SMA 11S s 50 % RAP SMA	
Asfaltová směs	1.A.1_3	
Rozměry zkušebního tělesa [mm]	50 x 50 x 200	
Datum zkoušky	5. 1. 2017	
Zkoušku provedl	Michal Slaviček	
Rychlost temperování [°C/hod]	10	
Maximální síla při porušení [kN]	10,08	
Max. napětí při porušení [MPa]	4,03	
Teplota v komoře při porušení [°C]	-27,2	
Teplota vzorku při porušení [°C]	-23,2	

